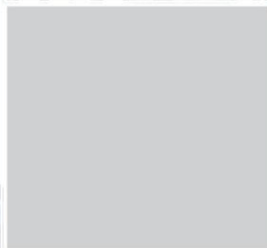
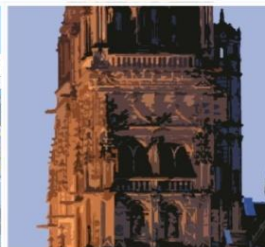
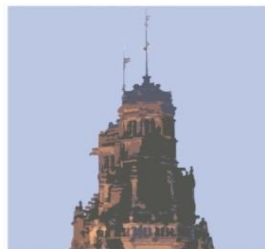




MAÎTRISE DES
RISQUES ET SÛRETÉ
DE FONCTIONNEMENT



**La maîtrise des risques
des systèmes complexes**



European Safety, Reliability and Data Association

*Le jugement d'expert
dans la maîtrise des risques industriels
et la sûreté de fonctionnement*

André LANNOY (IMdR)

Henri PROCACCIA (ESReDA)

V1.4, 12 04 2012



Le jugement d'expert

dans la maîtrise des risques industriels

et la sûreté de fonctionnement

- André LANNOY (IMdR), Henri PROCACCIA (ESReDA)

- V1.4, 12 04 2012



Résumé

Après avoir rappelé ce que sont l'expert et l'expertise et avoir dressé un bref historique de l'utilisation de l'expertise en maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement (depuis les années 50), l'exposé présentera les liens entre les concepts de risque - incertitude - retour d'expérience et expertise.

Les différentes étapes du recueil et du traitement de l'expertise seront ensuite décrites: sélection des experts, nombre d'experts à interroger, formation préalable, interrogation, analyse des réponses, prise en compte des biais et agrégation, contexte bayésien, démarche à suivre dans le cadre de la fiabilité des composants et des systèmes...

L'exposé sera enfin illustré par plusieurs applications réelles: démonstration de la sûreté, analyse de risque, prospective, estimation de durée de vie, croissance de fiabilité, maintenance, aide au diagnostic, pronostic et aide à la décision.



Plan

- 1 - Qu'est-ce que l'expertise ? Qu'est-ce qu'un expert?
- 2 – Risque, incertitude, expertise et retour d'expérience
- 3 - La démarche de recueil et d'analyse de l'expertise
 - 3.1 la démarche
 - 3.2 les biais cognitifs et motivationnels
 - 3.3 la sélection des experts
 - 3.4 la méthode d'élicitation
 - 3.5 la modélisation de l'expertise dans un contexte bayésien
- 4 – Le guide européen KEEJAM
- 5 – L'expertise en fiabilité
- 6 - Quelques exemples d'application
EPS, diagnostic, efficacité de la maintenance, OMF, analyse de Weibull, coûts de maintenance et durabilité, diagnostic et actions de maintenance, croissance de fiabilité, analyse de risque, anticipation et vieillissement
- 7 - Conclusions et perspectives
- 8 – Pour en savoir plus...



1 Qu'est-ce que l'expertise? Qu'est-ce qu'un expert?





Qu'est-ce que l'expertise?

Experior, iri: éprouver, faire l'essai de, l'expérience de

Peritus: qui sait par expérience, qui a la pratique

Periculum: 1 essai, expérience, épreuve; 2 danger, péril

Expertise:

+ A- 1 mesure d'instruction juridique; 2 estimation de la valeur (d'un objet d'art), étude de son authenticité

+ B- (d'après l'anglais) compétence

Expertise: skill in a particular field, know-how



Qu'est-ce qu'un expert?

Expertus: qui a fait ses preuves

Historiquement, augures, haruspices, oracles, pythies,...

Les « **présages** » sont de deux sortes (Veyne, 2005):

- des symptômes (fournis par le vol des oiseaux ou les entrailles),
- des signes, la Providence donnant une signification, qu'il faudra débrouiller, à un fait qui se passait à ce moment-là.

Expert: 1 qui a par l'expérience, par la pratique, acquis une grande habileté;

2 personne choisie pour ses connaissances techniques et chargée de faire des examens, des constatations, des évaluations à propos d'un fait d'un sujet précis;

3 spécialiste chargé de résoudre un problème technique auquel est confronté son client;

« Système-expert »

Expert: a special person with special knowledge or training



Qu'est ce que l'expertise ?

- C'est une **source de connaissances**.
- C'est une opinion autorisée et renseignée, fondée sur l'expérience.
- C'est une réponse possible à un problème technique, en vue de « faciliter » la décision d'un décideur.
- Elle permet de compléter, d'améliorer des données objectives quand elles existent, qu'elles sont peu nombreuses, douteuses, ou inapplicables, ou de les suppléer lorsque les données sont manquantes (par exemple dans le cas d'un mauvais retour d'expérience ou d'un problème futur, d'une innovation,...)
- C'est souvent la seule source d'information disponible, qui puisse permettre d'effectuer des prévisions dans un processus décisionnel.
- C'est une source d'information subjective, représentative d'une opinion autorisée et reconnue mais basée sur la connaissance, la formation, la pratique et l'expérience d'experts d'un domaine particulier, à un instant donné.
- C'est une source de données qui peuvent être **qualitatives ou quantitatives**.



Qu'est-ce qu'un expert?

L'expert est celui qui détient **du savoir-faire** (Ballay, 1997).

Son niveau d'expertise varie au fur et à mesure qu'il acquiert de nouvelles connaissances sur le sujet concerné.

L'expert possède:

- des éléments de connaissance sur son sujet,
- une expérience,
- une pratique,
- des savoirs non formalisés.

Il est apte à formuler **un jugement pertinent**, à communiquer sur son sujet.

Il se doit d'être **rigoureux, objectif, honnête, neutre**.



L'intérêt de l'expertise (1)

L'expertise constitue une source **d'information a priori**:

- intégrant, complétant, interprétant des données existantes,
- prévoyant ou anticipant des événements futurs, en estimant leur probabilité d'occurrence,
- déterminant l'état des connaissances et les manques,
- analysant le processus de raisonnement de l'expert mais aussi du processus de décision.



L'intérêt de l'expertise (2)

Elle s'avère indispensable lorsque :

- le **retour d'expérience est rare**, voire inexistant,

- le **futur n'est pas l'image du passé** :
 - . nouveau risque,
 - . conception nouvelle, innovation,
 - . modification de conception, rénovation,
 - . changement des conditions environnementales,
 - . modification des procédures d'exploitation, des programmes de maintenance.



Quelques caractéristiques

L'expertise est une donnée **incertaine**.

Plusieurs acteurs sont concernés par l'expertise:

- les experts,
- l'analyste (ou animateur ou modérateur),
- le décideur.

L'astrologue observe et prédit, l'expert pratique et juge, l'analyste estime et prévoit, le décideur décide et affirme.

Des méthodes **d'élicitation** existent. Beaucoup sont fondées sur **l'ingénierie des connaissances**.

Citons (voir Marle, 2005):

- **domaine des PSA**: CTN-UPM, FEJ-GRB, KEEJAM, NNC, NUREG-1150, STUK-VTT (comparaison dans un benchmark: *fuel coolant interaction studies in a nuclear reactor accident* (Cojazzi, Fogli, 2000), SEJ-TUD,
- **conception et analyse du retour d'expérience**: TRIZ-AFD,
- **durabilité**: LCM, NAM,
- **pronostic, anticipation, maintenance**: AVISE (2005), PMDA-PIRT (2007),
- **sûreté nucléaire , maintenance et compétitivité**: RIPBR.



Historique de l'utilisation de l'expertise quantifiée

- **Utilisation relativement récente.**

- Début de la mise au point de TRIZ (Altshuller, 1946)
- Rand Corporation (1949)
- Wash 1400 (1975): EPS, données EPS
- Recueil de données IEEE Std 500 (1977)
- Canvey-Island (1978): analyse de risque
- Utilisation de l'expertise dans les analyses et enquêtes du retour d'expérience (années 1980)
- Étude et guide NUREG 1150 (US NRC, 1989)
- T-Book (1994?), EIReDA (1999)
- ISdF, projet sur la comparaison des techniques fréquentielles et bayésiennes (1999)
- KEEJAM (1997 à 2000): étude du JRC Ispra avec U. Bologne – Brescia; guide européen.
- Publication d'un ouvrage en langue française (2001).
- TRIZ-AFD (Kaplan, 1997 à 2002): conception, analyse de défaillances et anticipation (*failure analysis; failure prediction*)
- LCM-NAM (2000 à 2003): gestion de cycle de vie
- Prospective, anticipation, pronostic, analyse de risque (depuis 1998)
- Analyse du facteur humain (HRA) et des processus organisationnels (depuis les années 2k)
- PMDA-PIRT (2007): anticipation, analyse des dégradations



2 Risque, incertitude, expertise et retour d'expérience





Les 4 phases de l'analyse de risque

- 1 Identification des risques
Compréhension physique, attention sur les facteurs de risque (les causes), les cibles (la vulnérabilité)
- 2 Estimation et hiérarchisation des risques, criticité, évaluation
Démarche qualitative et quantitative (caractérisation probabiliste et déterministe; modélisation physico-fiabiliste)
- 3 Traitement des risques (les parades)
 - Options de maîtrise des risques (l'occurrence des causes (*prévention*) ou la gravité des conséquences (*protection*))
 - Optimisation, aide à la décision
 - Plan de sécurité, barrières
 - Couverture du risque résiduel (assurance, auto-assurance)
- 4 Contrôle et retour d'expérience
Suivi des actions, efficacité, efficience



- **1 Identification des risques**

Compréhension physique

Recherche des facteurs de risque, des objets à risque, des vulnérabilités

Anticipation, prospective

- **2 Estimation et hiérarchisation des risques, criticité, évaluation**

Estimation des incertitudes

Evaluation probabiliste, analyse de risque

Fiabilité

Diagnostic et pronostic

- **3 Traitement des risques (les parades)**

Aide à la maintenance

Choix des options, évaluation des options

Processus de la décision, élicitation des préférences, méthodes multicritères

- **4 Contrôle et retour d'expérience**

Analyse du retour d'expérience

Efficacité des parades



L'estimation probabiliste (phase 2)

Plusieurs visions conceptuelles

D'abord, la **vision objective** fondée sur l'analyse a priori. Exemple: modélisation d'une situation. En général (sauf dans les jeux de hasard), cette vision est *inapplicable* pour évaluer des probabilités réelles.

Les autres visions sont fondées sur l'expérience.

On distingue deux grands types :

- la **vision fréquentielle**, dite **objective**, fondée sur la fréquence d'observation d'évènements sur le long terme, a posteriori (problème de la rareté des évènements), un point de vue de physicien, une volonté d'objectivité; prévision des situations "risquées" déterminées objectivement.
- la **vision bayésienne**, dite **subjective**, fondée sur le degré de croyance que l'on porte à la réalisation d'un événement incertain, sur la base d'une connaissance a priori (problème de la qualité de la connaissance a priori); application aux situations incertaines difficilement probabilisables objectivement (probabilités bayésiennes, degré de croyance, probabilités "épistémiques").



Estimation probabiliste, risque et incertitude

Le risque est **l'effet de l'incertitude sur les objectifs** (ISO 31000, 2009). Cet effet est un écart (positif ou négatif) par rapport à la valeur attendue.

L'incertitude est liée au futur: on cherche à la mesurer; elle est souvent difficile à évaluer faute de données passées fiables et représentatives, permettant de définir la probabilité d'occurrence d'un événement redouté futur. Le futur est de moins en moins prévisible, le monde est de plus en plus erratique.

La probabilité d'occurrence va mesurer la chance de l'occurrence d'un événement redouté:

- soit une fréquence relative fondée sur l'observation et l'interprétation du retour d'expérience historique,
- soit une probabilité fondée sur les connaissances et l'expertise (*judgement/ knowledge based probability*) .



La définition du retour d'expérience

(Dictionnaire d'analyse et de gestion des risques, 2006)

Formalisation de la prise en compte de l'expérience tirée d'une activité passée et de la transmission du savoir afin d'améliorer la qualité et l'efficacité des produits.

Objectifs:

diminuer les erreurs en nombre et gravité

reconduire les processus qui fonctionnent (opportunités)

améliorer les méthodes de travail

diminuer le risque d'écart aux objectifs spécifiés (performances techniques, qualité, coûts et délais)

Sources: **opinions d'experts;** rapports techniques, actions et recommandations résultant de revues; **analyses de défaillances** et de non conformité; bilan de fin de projet; réclamations de clients; alertes

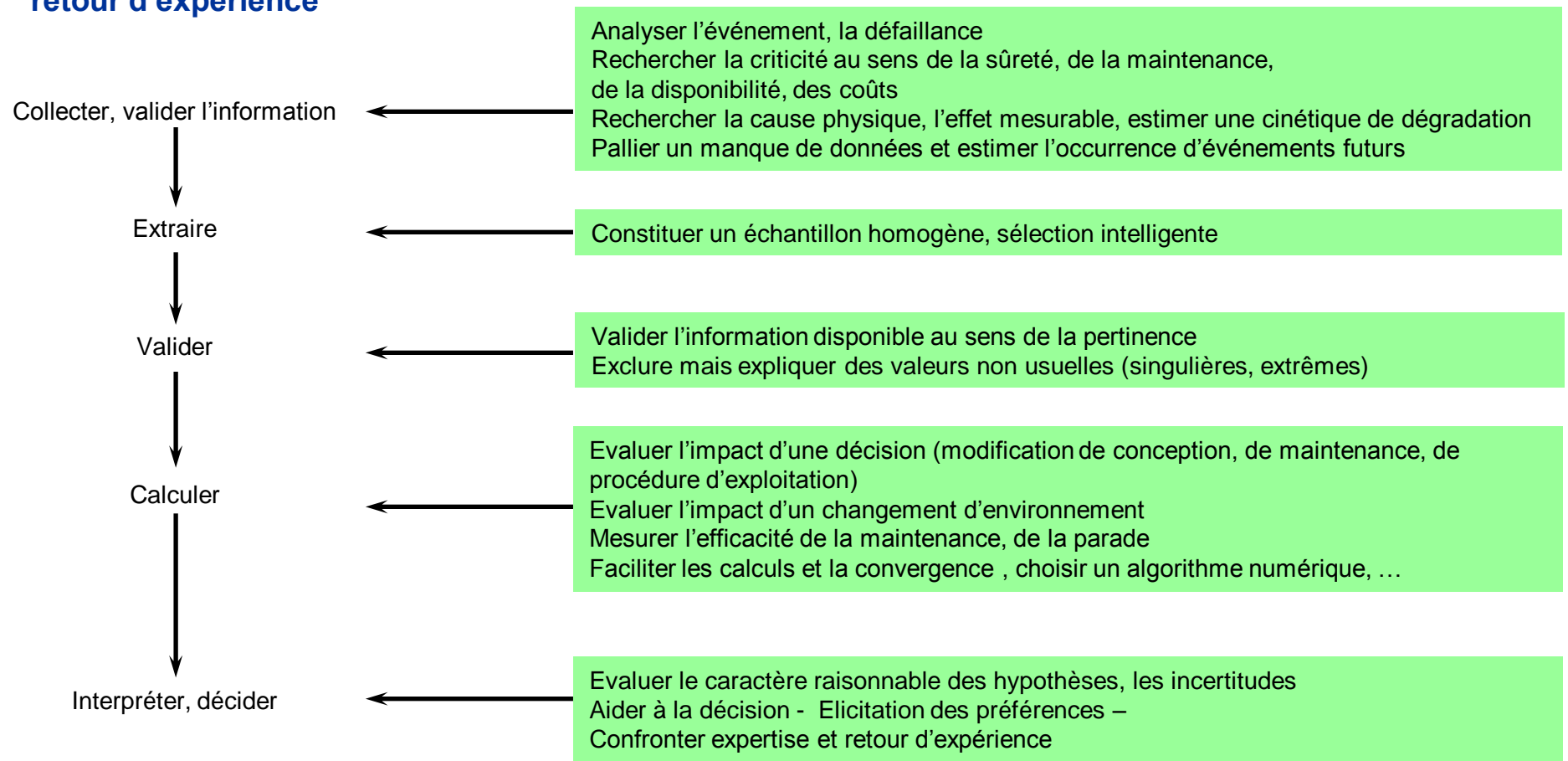


Apports de l'expertise à la démarche du retour d'expérience

L'expérience

La démarche du retour d'expérience

L'apport de l'expertise





3 La démarche de recueil et d'analyse de l'expertise



"I know nothing about the subject,
but I'm happy to give you my expert opinion."



3.1 Les fondements d'une démarche structurée de recueil et d'analyse de l'expertise

Une démarche rigoureusement scientifique paraît difficile à élaborer.

Les problèmes concernent :

- 1 - le choix des experts,
- 2 - l'élicitation de l'expertise, où l'on peut distinguer différentes méthodes d'interrogation :
 - les interviews individuels,
 - les groupes interactifs,
 - la méthode Delphi,
- 3 - l'analyse des réponses d'experts :
 - la prise en compte des biais,
 - la pondération et l'agrégation des expertises (leur étalonnage) ;
- 4 - la modélisation des réponses et des incertitudes,
- 5 - les efforts, le savoir-faire, et les coûts à consentir pour recueillir, analyser et modéliser les expertises.
- 6- la capitalisation (*knowledge management*).



Ce que dit la norme...

norme NF X 50-110 – *qualité en expertise - prescriptions générales de compétence et d'aptitudes requises pour élaborer une expertise* (mai 2003)

- évaluer** la question posée ;
- sélectionner** un ou plusieurs experts ayant les compétences adéquates ;
- choisir** ou élaborer une méthode d'expertise appropriée à la question posée;
- réaliser** des actions (études, interviews,..) spécifiques à l'expertise demandée;
- analyser** de façon critique les données fournies et les actions menées ;
- fournir** au client le produit de l'expertise ;
- gérer** les aléas, les incidents et les évolutions.



3.2 Les biais cognitifs et motivationnels

Tout écart par rapport à la vérité représente un **biais**.

Le biais perturbe la qualité de l'expertise.

On distingue deux types de biais dans le recueil de l'expertise :

1. **les biais de situation**, dus au filtre mental de l'expert vis à vis de la réalité, et parmi lesquels :
 - les biais cognitifs liés aux limites intellectuelles, et à la difficulté de réviser son jugement lorsque de nouvelles informations arrivent,
 - les biais motivationnels liés au processus d'élicitation et à la pression de l'environnement;
2. **les biais de confiance excessive** : une valeur vraie affirmée par un expert avec 90% de chance se situe en réalité autour de 30 à 60%, la moyenne de l'expert correspond à la médiane.



Les biais cognitifs

Ils sont dus aux limites humaines sur la quantité d'information assimilable et aux limites de la mémoire : la plupart des individus ne savent pas discriminer plusieurs notions à la fois (biais d'incohérence).

Si le problème est complexe, toute information nouvelle est intégrée de façon séquentielle et à petite dose, d'où la difficulté de révision : la première impression souvent domine (biais d'ancrage d'opinion ou de conviction profonde).

Les données marquantes, telles que les accidents graves, les événements exceptionnels, sont plus facilement mémorisées que les autres, et conduisent à une surestimation de leur probabilité (et donc à une sous-estimation pour les autres événements) : ce biais est appelé par les spécialistes **biais de disponibilité**.

Les biais cognitifs se traduisent par l'impossibilité de suivre les règles probabilistes, logiques ou statistiques.



Les biais motivationnels

Ces biais altèrent les réponses des experts en fonction de leur environnement et de l'analyste.

On distingue :

- **la pression sociale** :
 - imposée par l'analyste,
 - du groupe,
 - d'intérêt, vis à vis du management,
 - de situation (par exemple, un contexte de sécurité – sûreté);
- **la pression d'erreur d'interprétation** :
 - relative à la question posée,
 - relative à l'information donnée par l'expert,
 - ou sur la traduction de l'expertise sous une forme utilisable.



L'élicitation de l' expertise

Définition

C'est le processus permettant de recueillir et assembler les opinions d'experts. Elle comprend l'interrogation, l'étalonnage (la « calibration »), la pondération des experts.

Origine

Certains préfèrent: explicitation, élucidation, stimulation, extraction ...
elicere: tirer de, faire sortir, arracher, obtenir (*ex aliquo verbum elicere*)
to elicit: to get, to draw out, cause to come out

Les différentes formes d'élicitation

Trois d'entre elles sont fondamentales :

- les entretiens individuels,
- l'interrogation en groupe interactifs,
- la méthode Delphi.

Les méthodes

La communication entre experts et analyste s'établit :

- de façon verbale, par contact direct,
- par rapport écrit (permet plus facilement la capitalisation),
- par téléphone,
- par courrier (postal ou électronique).



3.3 La sélection des experts

La sélection des experts s'effectue en fonction de :

- l'expérience, l'implication dans le domaine considéré, la pratique, la proximité du domaine considéré,
- les connaissances, la formation,
- la notoriété, la réputation,
- la familiarité avec les concepts d'incertitude,
- et surtout la disponibilité : le processus d'élicitation demande beaucoup de temps.



Les problèmes liés au choix des experts

Un expert a des connaissances particulières avec un niveau de détail (une granulométrie) suffisant(e) dans un domaine.

Ces connaissances dépendent:

- du moment,
- des **capacités mentales** de l'expert qui doit :
 - **comprendre** les objectifs de son expertise, les questions, d'où l'importance de l'analyste (du modérateur),
 - **synthétiser et rendre accessible** l'information qu'il possède,
 - pouvoir **émettre des jugements** et donner une réponse en explicitant la **façon dont celle-ci est élaborée** (les arguments en faveur de son expertise),
- du **contexte social** et de l'environnement, des objectifs de l'expertise, qui peuvent perturber l'expert, et par conséquent **biais**er son jugement.



Le nombre d'experts à éliciter

Dans certains domaines (médecine, psychologie, économie, sport...), **le nombre** d'experts est considéré plus important que leur **qualité**.

- Dans le domaine technique (en particulier en maîtrise des risques), le choix de personnes **notables** serait préférable. L'étude en est crédibilisée auprès du public. Cependant, en fiabilité et maintenance, **les experts « opérationnels »** (exploitants, ingénieurs de maintenance, hommes de terrain) sont souvent préférables aux grands experts pointus,
- La **diversité** des experts doit être encouragée car elle permet une limitation des biais. Il faut éviter de n'interroger que des experts d'un même domaine, d'une même formation, que des experts pointus... (absence de créativité, peu de possibilités d'innovation, conflit possible...)
- Le **nombre d'experts** à prendre en compte peut varier considérablement :

Il est de toute façon préférable de disposer de nombreux experts

2 est le minimum, mais aussi le cas le plus courant

Remarque : 1/3 à 3/4 seulement des experts consultés acceptent de participer (**problème de la sécurité – sûreté**).



Motivation et formation des experts

Les experts doivent être **motivés** afin d'obtenir une bonne participation :

a) **Côtés positifs** de leur sélection :

- la reconnaissance de leurs mérites,
- l'importance du **projet**,
- l'importance de leur **rôle** dans le projet,
- la **confrontation** avec d'autres experts;

b) **Côtés négatifs** :

- **le temps** d'expertise,
- éventuellement la rémunération de l'expertise,
- l'impression que l'on teste leurs connaissances.

Une **préformation** des experts est nécessaire avant l'élicitation, afin de les **sensibiliser** sur les méthodes utilisées et à la bonne compréhension des objectifs et du problème entre tous les protagonistes.



Qualité d'un processus d'élicitation

- Poursuivre l'objectif, s'attacher au processus de résolution du problème
- Identifier, évaluer et contrôler les facteurs d'influence
- Respecter la pensée de l'expert et être compris



3.4 Les méthodes d'élicitation

- 1 - **Les entretiens individuels** : respect de l'anonymat, franchise, mais forte influence de l'analyste.

Cette méthode est préférée dans le cas **d'estimations quantitatives**. Elle peut permettre de mettre en évidence des incertitudes sous la forme de fdp.

- 2 - **L'interrogation de groupe** : consensus, mais forte influence du « meneur », problème de conflit.

Cette méthode d'interrogation sera privilégiée lorsque l'objectif est de **créativité**. Une attention particulière doit être portée aux expertises « exotiques ».

- 3 - **La Méthode Delphi** (Dalkey, Helmer, 1963)

C'est la démarche **la plus populaire** et la plus souvent utilisée :

- les experts subissent une séance de **préformation**,
- ils sont ensuite **isolés** et transmettent leur jugement à l'analyste,
- l'ensemble des jugements, **rendus anonymes**, sont renvoyés à chacun des experts pour éventuelle révision,
- le processus est répété jusqu'au **consensus**,
- le tout est **tracé** dans un rapport final.



L'établissement du questionnaire

- Il faut le préparer par **écrit**.
- Les questions doivent être simples.
- Il doit être **adapté aux objectifs**, au problème posé.
- Il doit être **adapté aux experts** : ils doivent comprendre le sens, le but des questions et la façon dont elles seront utilisées.
- Les questions ne doivent pas introduire **de biais**.
- Elles seront différentes selon que les experts ont ou n'ont pas de culture statistique (le plus souvent).
- Elles peuvent être **qualitatives** et permettre ainsi d'établir des **échelles** de valeurs relatives (par exemple, échelles de Lichtenstein-Newman, Sherman-Kent).
- Elles peuvent être **quantitatives** (mais c'est rare) et permettre ainsi d'élaborer directement des **distributions de probabilité**, des échelles hiérarchiques, des valeurs moyennes, médianes, des valeurs extrêmes ou des comparaisons de probabilité; il est maintenant facile de modéliser de telles informations (par exemple, par une fdp, un intervalle de confiance).



La prise en compte des biais

Au cours de **l'élicitation**, l'analyste doit tenir compte des biais possibles :

- **la sensibilisation** des experts aux objectifs et aux méthodes utilisées,
- **la pression sociale du groupe** (due à l'analyste, au management, de conformité au groupe) : se méfier de l'unanimité,
- **la motivation** d'intérêt personnel : opposer les experts,
- **l'incohérence** : les limites de la mémoire, la confusion statistique, les réponses contradictoires,
- **la disponibilité** : différence de traitement entre événements passés marquants et présents,
- **la conviction profonde** : impossibilité de modifier son jugement après une information nouvelle,
- **la sous-estimation de l'incertitude** : par exemple, une estimation à 90% correspondrait en fait à 60%.



Concepts	Probabilité moyenne	Intervalle d'incertitude
.		
Trés probable	0.89	0.60 0.99
Probable	0.79	0.30 0.99
Vraisemblable	0.71	0.10 0.99
Possible	0.37	0.01 0.99
Improbable	0.12	0.01 0.50
Invraisemblable	0.11	0.01 0.40
Hautement improbable	0.06	0.01 0.30

Echelle psychologique de Lichtenstein et Newman



Echelle hiérarchique de Sherman Kent

Estimation	Chance(s) sur 10	%
Pratiquement certain	8 à 9	80 à 99
Probable	6 à 7	60 à 80
Chances égales	4 à 5	40 à 60
Improbable	2 à 3	20 à 40
Pratiquement impossible	1 à 2	10 à 20



L'étalonnage des experts

(Lindley, 1988; Clarotti, 1998)

Il permet de corriger et de rectifier les biais, de classer les experts.

- 1 - Evaluation de la **pertinence** de l'expert, par l'étude du raisonnement qui a conduit à l'estimation, d'où scores d'experts.
- 2 - Evaluation des connaissances ou de l'entropie E (Kullback, Leibler, 1951) :

$$E = - \sum P (i) . \text{Ln} [P (i)].$$

Mesure de l'incertitude. Un enrichissement se traduit par une diminution de l'entropie.

- 3 - Utilisation de **variables témoins** (Cooke, 1991)

- l'expert détermine une **distribution de probabilité (P)**, à partir de n variables témoins (i) fournies par l'analyste,
- cette distribution est **comparée à la distribution vraie S** à partir des échantillons déduits de S : $S(i)$,
- **l'indice d'information relative I**, mesure l'écart relatif entre les deux distributions S et P :

$$I (S, P) = \sum S (i) . \text{Ln} [S (i) / P (i)].$$

Il permet d'établir des scores d'experts: $I = 0$ = expert bien étalonné;

I élevé, expert mauvais.



Evaluation du coefficient de corrélation

$\rho = 0$ —> **Experts indépendants**

$\rho = 1$ —> **Experts totalement corrélés**

$\rho = -1$ —> **Experts en opposition**

Mesure de la dépendance entre experts.

Méthodes:

- évaluation **subjective** a priori qualitative de l'analyste,
- évaluation **semi quantitative par échelles linéaires** (recherche des facteurs défavorables à une dépendance),
- évaluation **quantitative a posteriori** à partir des réponses d'experts.



Prise en compte du retour d'expérience

- Conforter l'approche
- Mettre en évidence un éventuel désaccord entre retour d'expérience et expertise
- Mieux estimer
- Valider l'expertise
- Disposer d'un retour d'expérience est donc très important



Les réponses des experts

- Réponses qualitatives
- Interprétations
- Valeurs quantitatives, physiques ou probabilistes, intervalles de variation
- Probabilités, fréquences, côtes (1 chance sur ..., ...)
- Réponses binaires (oui / non)
- Distributions (nature, moyenne, médiane, quantiles, intervalles de confiance, ...)
- Comparaisons (par paires, loteries, ...)
- Notes
- *Remarque:* la plupart des réponses quantitatives des experts sont **soit des réponses binaires, soit des intervalles**



3.5 Les méthodes de traitement, le contexte bayésien

- Modèle statistique:
 $X \rightarrow P (. | \theta)$
 θ vecteur paramètre inconnu
 $\theta \rightarrow \Pi (\theta)$ (distribution a priori)
- Intégration de la connaissance des experts par Π
- Situation souvent rencontrée en maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement

Principe de la démarche bayésienne



Jugements d'experts

Retour d'expérience passé

Densité de probabilité a priori

Données du retour d'expérience récent

THEOREME DE BAYES

Fonction de vraisemblance données D

Nouvel a priori

Densité de probabilité a posteriori sachant D



1. Distribution de probabilité **a priori**, intégrant l'ensemble de la connaissance sur le système dès la conception avec son incertitude
→ distribution a priori: $\Pi_0(\theta)$
2. Distribution de la **vraisemblance**, à partir des observations du retour d'expérience (ici, dans le cas d'un retour d'expérience d'un composant de fiabilité R, avec i: défaillances et j: censures à droite):

$$L(D/\theta) = \left\{ \prod_i f(t_i, \theta) \right\} \left\{ \prod_j R(t_j, \theta) \right\}$$

Défaillances i / survies j



Le traitement bayésien

3. Distribution de probabilité **a posteriori** *conditionnelle*, exprimant la connaissance sur le système après fusion de l'a priori et de la vraisemblance (retour d'expérience),

$\Pi_1(\theta / \text{Données})$:

a priori / retour d'expérience

$$\Pi_1(\theta / D) = \frac{\Pi_0(\theta) \cdot L(D/\theta)}{\int_{\Omega} \Pi_0(\theta) \cdot L(D/\theta) d\theta}$$



Les difficultés de la démarche bayésienne

- Les **données hétérogènes** : retour d'expérience objectif, expertise subjective → problèmes du recueil et de la modélisation.
- Le **choix de la distribution a priori**, qui est fonction de l'état des connaissances initiales.
- Le **calcul de l'a posteriori**.



Construction de l'a priori

Plusieurs expertises disponibles pour l'expertise i:

$$\prod x_i(\theta) = \prod(\theta \mid \lambda_i), \quad \prod(\theta) ?$$

- Privilégier les différences

$$\prod(\theta) = \sum w_i \cdot \prod(\theta \mid \lambda_i)$$

- Privilégier le consensus

$$\lambda_m = \sum w_i \cdot \lambda_i, \quad \prod(\theta) = \prod(\theta \mid \lambda_m)$$

Mais **poids** w_i des experts? Interactions entre experts?



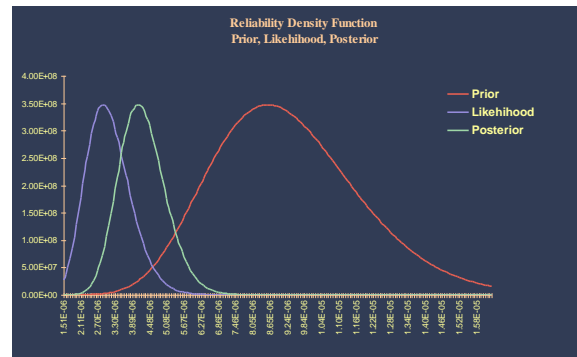
Interprétation de l'a posteriori

C'est une **pondération** entre l'a priori et les données observées.

A un coefficient de proportionnalité près, on peut écrire:

$$\mathbf{a\ posteriori} \approx \mathbf{a\ priori} \times \mathbf{vraisemblance}.$$

L'a posteriori est « **attirée** » par la densité **la plus « informative »**.



- Cas où **les données de retour d'expérience sont importantes** → elles dominent l'a posteriori; est-ce pertinent ? → règles de bon sens, « **opérationnel** »
- Cas où **les données de retour d'expérience sont rares ou en présence de modifications** → l'a priori doit conditionner l'a posteriori, « **prévisionnel** ».



Les distributions conjuguées

- Deux distributions sont dites conjuguées lorsqu'elles appartiennent à la même famille mathématique.
- Dans ces conditions, le produit de deux distributions conjuguées est une distribution appartenant à cette même famille mathématique et dont les paramètres sont la somme des paramètres des deux distributions.
- Exemple de la loi gamma*:
 - $g(a, b) \times \exp(k, t) = g(a+k, b+t)^*$
 - En conséquence, aucun calcul n'est à effectuer pour déterminer la distribution a posteriori de deux distributions conjuguées.
 - Si les distributions sont quelconques, des procédures numériques sont nécessaires.

$$g_0(\lambda) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \lambda^{a-1} \exp[-b\lambda]$$

*



Exemple d'un cas couramment rencontré

Exemple de la réactualisation d'un recueil de données de fiabilité

1) **A priori**: expertise disponible, données génériques, ou retour d'expérience passé.

L'a priori est modélisée par une **loi gamma** $g(a, b)$.

$$g_0(\lambda) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \lambda^{a-1} \exp[-\lambda b]$$

2) On dispose de n nouvelles observations indépendantes t_i que l'on suppose issues d'une loi exponentielle de paramètre λ .

La **vraisemblance** est: $\prod (\lambda_i \cdot \exp(-\lambda \cdot t_i))$, pour $i = 1, n$.

3) **L'a posteriori** s'écrit:

$$\Pi_1(\lambda / t_1, \dots, t_n) = g(a + n, b + \sum t_i)$$

de moyenne a posteriori:

$$(a + n) / (b + \sum t_i),$$

valeur à comparer à l'estimation fréquentielle $n / \sum t_i$.



En conclusion ...

- Le traitement bayésien permet la prise en compte de toute expertise et de tout retour d'expérience structuré.
- Il est d'autant plus intéressant que les expertises sont « **hétérogènes** », qu'il n'y a pas dépendance entre experts.
- Une **analyse de sensibilité** est toujours à mener lors de l'analyse des expertises.



4 Le guide européen KEEJAM





Le guide européen (Cojazzi et al, 1998)

C'est un protocole en **15 étapes** destiné à assimiler le jugement d'expert à une **source de données scientifiques**.

Démarche KEEJAM (*Knowledge Engineering Expert Judgement Acquisition and Modelling*), fondée sur l'ingénierie de la connaissance.

- Etape 1 :** **Document de définition** du cas à étudier : objectifs, informations connues, ce qui est attendu des experts, et comment seront utilisées leurs connaissances.
- Etape 2 :** **Identification des variables** objectifs de l'étude.
- Etape 3 :** **Identification des variables d'interrogation** : elles doivent être des variables **observables**.
- Etape 4 :** **Identification des variables connues** du domaine: si elles ne sont pas connues de l'expert, elles permettront de **l'étalonner**.
- Etape 5 :** **Identification des experts**.
- Etape 6 :** **Sélection des experts**. C'est une procédure formelle nécessitant un comité de sélection ou une équipe de projet.



Le guide européen KEEJAM

- Etape 7 :** **Définition et rédaction du questionnaire.** Chaque question doit être explicitée et en particulier la forme attendue des réponses.
- Etape 8 :** **Exercice à blanc.** Il a pour but de tester le document de définition et le questionnaire auprès de 1 ou 2 experts. Finalisation du questionnaire.
- Etape 9 :** **Formation des experts** sur les méthodes statistiques et probabilistes, sur l'utilisation de leurs réponses.
- Etape 10 :** **Elicitation des experts :** l'interview individuel par un analyste **normatif** (spécialiste en probabilités), **assisté** d'un analyste **substantif** (expert du domaine), est recommandé.
- Etape 11 :** **Agrégation de l'expertise :** les experts peuvent être pondérés à partir des variables connues (Etape 4); leurs réponses sont ensuite agrégées (Bayes).
- Etape 12 :** **Analyse de robustesse et de dispersion :** afin de mesurer le poids relatif des données d'expertise obtenues, en les supprimant une à une et en examinant la perte d'information correspondante.
- Etape 13 :** **Retour des résultats auprès des experts** avec, anonymement, leurs propres évaluations et leur étalonnage.
- Etape 14 :** **Analyse finale :** distributions de probabilité.
- Etape 15 :** **Documentation.** Rapport formel **traçant** l'ensemble de la procédure.



5 L'expertise en fiabilité





L'expertise en fiabilité, *rappel...*

L'approche fréquentielle fondée sur le retour d'expérience est utilisée pour estimer le comportement futur d'un composant.

Cette approche **est limitée** quand:

- le retour d'expérience est faible,
- le composant a connu des modifications de conception – environnement - exploitation - maintenance,
- le composant est nouveau,
- des phénomènes de vieillissement – dégradation, non attendus, se manifestent.

L'approche bayésienne est particulièrement bien adaptée dans ces conditions.



Démarches pratiquées en fiabilité

Phase de **préélicitation**

- Choix d'experts de différentes **origines** (notamment: exploitants, ingénieurs de maintenance et de retour d'expérience, concepteurs, fiabilistes).
- L'expertise est limitée à quelques experts (quelquefois une **dizaine**) mais souvent à **deux experts**.
- Interviews **individuels**.
- Questionnaire (souvent **qualitatif**), dirigé par l'analyste; obtention de:
 - données qualitatives,
 - valeurs moyennes ou médianes,
 - données censurées,
 - données extrêmes,
 - données binaires,

Synthèse et retour avant modélisation

- éventuelle Inter-corrélation (lorsque le nombre d'experts est limité).
- pondération.

Modélisation bayésienne.

Validation par le retour d'expérience.



Modéliser l'expertise en fonction des types de réponses obtenues au cours de l'élicitation

En fonction des questionnaires, on obtient principalement des :

- **réponses binaires**,
- valeurs moyennes,
- valeurs médianes (valeur à privilégier),
- données censurées à droite
- **intervalles de variation** : dispersion, quantiles,
- données multi-censurées.

Des logiciels du commerce (comme REXPERT) permettent **de recueillir, de modéliser et d'archiver dans une base de données**, ces informations qui seront ensuite jointes au retour d'expérience dans une démarche bayésienne.



L'expertise dichotomique ou binaire

Souvent l'expert ne veut pas s'engager sur une valeur (ex: **durée de vie** d'un matériel ou **chances de succès**).

L'analyste propose donc des valeurs que l'expert accepte (**oui = 1**) ou refuse (**non = 0**).

On considère l'expertise comme des résultats d'essais (mais biais d'acquiescement).

La fonction de vraisemblance est du type **binomial** relativement à la valeur de l'estimateur cherché.

Pour que l'échantillon d'expertise représente toutes les valeurs possibles du paramètre (en particulier les valeurs extrêmes), et qu'il soit essentiellement dépendant de l'expertise, on l'associe à une distribution a priori non informative : la distribution **uniforme dite d'ignorance [0,1]**.

Par application du théorème de Bayes, on obtient une distribution a **posteriori bêta complètement dominée par les expertises**.



Modélisation d'une valeur moyenne

Les experts sont en mesure d'exprimer la **valeur moyenne** d'un paramètre, comme une **durée de vie** moyenne ou une **probabilité moyenne de défaillance à la sollicitation**, .

$$E = (q_1, q_2, \dots, q_n) = q_E .$$

C'est une information diffuse sur la distribution de cette variable.

On la modélise par une distribution **uniforme, peu informative**, bornée **par 0 et une valeur maximale q^*** compatible avec la valeur moyenne estimée par les experts.

q_E doit donc être **l'espérance** de la distribution a priori non informative, bornée par q^* , telle que (Clarotti, 1998) :

$$q^* = 2 q_E .$$



Données censurées

Les experts sont en mesure d'estimer (hypothèse **exponentielle**) différents types de paramètres de fiabilité:

- le **temps à la défaillance t** d'un matériel :

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t),$$

- une **survie supérieure à t** :

$$R(t) = \exp(-\lambda t),$$

- le matériel **survit moins que t**:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t),$$

- le matériel **défaill**e entre t_1 et t_2 :

$$R(t_1) - R(t_2) = \exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2).$$

On détermine la fonction de **vraisemblance des expertises** (produit) et à l'aide de logiciels statistiques on calcule un intervalle de confiance.

Le calcul peut s'avérer complexe et entraîner l'utilisation d'un logiciel.



Exemple : expertise censurée, calcul manuel

1 Expert 1 : défaillance à $t = 5000$ h

Expert 2 : survie à $t = 4500$ h

Expert 3 : défaillance entre 4000 et 5200 h

Expert 4 : défaillance avant 6000 h

Expert 5 : défaillance entre 2000 et 8000 h

2 **Vraisemblance de l'expertise :**

$$L = \lambda \exp [-\lambda 5000] \cdot \exp [-\lambda 4500] \cdot [\exp (-\lambda 4000) - \exp (-\lambda 5200)].$$

$$[1 - \exp (-\lambda 6000)] \cdot [\exp (-\lambda 2000) - \exp (-\lambda 8000)]$$

3 **Estimateur a priori de λ :** 2.88 E-4 / h

intervalle de crédibilité à 90%: $[1.7 \text{ E-4} ; 3.9 \text{ E-4}]$

d'où loi gamma : $g [21 ; 7.30 \text{ E-4}]$

4 **Retour d'expérience :** 10 défaillances / 80000 h observées

5 **Estimateur bayésien a posteriori:** $\lambda = 31 / 153000 = 2.00 \text{ E-4 / h}$

intervalle de crédibilité à 90%: $[1.4 \text{ E-4} ; 2.6 \text{ E-4}]$

Prior Likelihood 1 Likelihood 2 Likelihood 3 Likelihood 4

Input data

Obsevation data

REX

Number of failure (s)

Cumulate operating time

Confidence rate min %

Confidence rate max %

Informative Uniform Expertise

Confidence interval

Lambda min

Lambda max

confidence rate [%]

Gamma distribution

**Expertises
informatives**

Confidence interval

Lambda min

Lambda max

Confidence interval %

Gamma distribution

Shape factor

Scale factor

Confidence interval %

Non Informative Uniform Expertise

**Expertise
Non Informatives
Uniforme**

Mean value of the failure time

Time	Time
1	
2	
3	
4	
5	

Censored data

Expertises

Failure time

Left censored time

Right censored time

Interval time

Failure	Time	Type
1	5000	TE
2	4500	TG
3	6000	TD
4	4000	5200
5	2000	8000
6		
7		
8		
9		
10		

Information Weighting

	Reference	Fisher Information	Adequation	Quality	Free Weighting
Prior	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 1	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 3	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 4	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Pondération
Etalonnage
Experts**

Prior Parameters frequential estimate

Expectation

Standard deviation

Fisher Information

Weight Coefficient

Shape Parameter a

Scale Parameter b

Lambda min

Lambda Max

Confidence Rate

Shape Parameter a'

Scale Parameter b'

Paramètres fréquentiels



Integrate a form Integrate a study Save form



Return Estimation Calculate

Retour d'expérience

REXPert V6.0 : Failure Rate computation (exponential-gamma data)

Prior Likelihood 1 Likelihood 2 Likelihood 3 Likelihood 4

Input data

Observation data

Number of failure (s)
Cumulate operating time
Confidence rate min %
Confidence rate max %

Gamma distribution

Confidence interval Gamma law parameters
Lambda min
Lambda max
Confidence interval %
Shape factor
Scale factor
Confidence interval %

REX

Paramètres fréquentiels

Information Weighting

	Reference	Fisher Information	Adequation	Quality	Free Weighting
Prior	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 3	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Likelihood 4	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Likelihood 1 Parameters frequential estimate

Expectation	<input type="text" value="1.25E-04"/>	Lambda min	<input type="text" value="7.78E-05"/>
Standard deviation	<input type="text" value="3.95E-05"/>	Lambda Max	<input type="text" value="1.78E-04"/>
Fisher Information	<input type="text" value="6.40E+08"/>	Confidence Rate	<input type="text" value="8.00E+01"/>
Weight Coefficient	<input type="text" value="1.00E+00"/>	Shape Parameter a	<input type="text" value="1.00E+01"/>
Shape Parameter a	<input type="text" value="1.00E+01"/>	Scale Parameter b'	<input type="text" value="8.00E+04"/>
Scale Parameter b	<input type="text" value="8.00E+04"/>		



Integrate a form

Integrate a study

Save form



Return

Estimation

Calculate

Résultats

REXPert V6.0 : Failure Rate computation (exponential-gamma data)

France

Intervalle

Pondération

Paramètres gamma

PRIOR

Estimator	Confidence Interval		Weight Coefficient	Gamma law Parameters	
	Min	Max		Shape Parameter	
Expectation			Fisher Information	a	a'
	2.86E-04	3.96E-04	1.00E+00	2.09E+01	2.09E+01
Standard Deviation		Quantile	Coefficient	Scale Parameter	b'
	6.26E-05	90	1.00E+00	7.29E+04	7.29E+04

Likelihood

Estimator	Confidence Interval		Weight Coefficient	Gamma law Parameters	
	Min	Max		Shape Parameter	
Expectation			Fisher Information	a	a'
	1.25E-04	1.78E-04	6.40E+08	1.00E+01	1.00E+01
Standard Deviation		Quantile	Coefficient	Scale Parameter	b'
	3.95E-05	80	1.00E+00	8.00E+04	8.00E+04

Posterior

Estimator	Confidence Interval		Weight Coefficient	Gamma law Parameters	
	Min	Max		Shape Parameter	
Expectation			Fisher Information	a	a'
	2.02E-04	2.65E-04	7.58E+08	3.09E+01	3.09E+01
Standard Deviation		Quantile	Coefficient	Scale Parameter	b'
	3.63E-05	90	1.00E+00	1.53E+05	1.53E+05



Create a form

Save the Study



Details

Home

Return

A priori

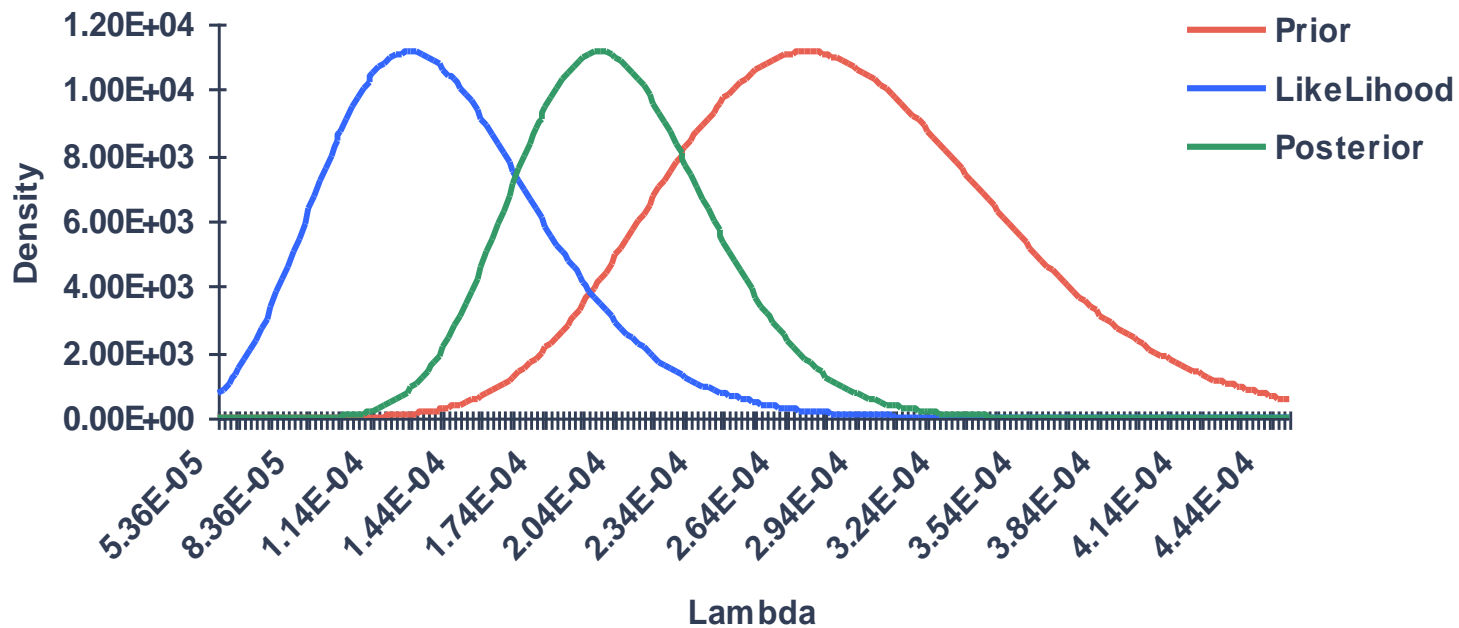
Retour
d'expérience

A posteriori



Graphes

LAMBDA Density Function
Prior, LikeLihood, Posterior





6 Quelques exemples d'application



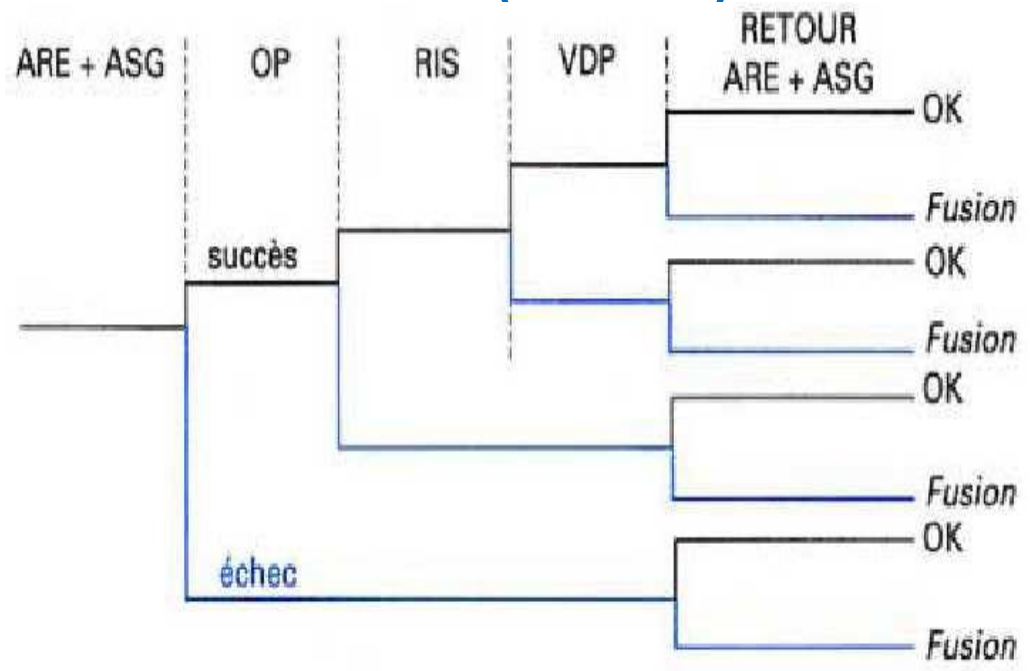


Exemple 1: le Wash 1400 (1975)

Il s'agit de la première **EPS**.

Une EPS peut représenter :

- 500 arbres d'événements
- 2519 arbres de défaillances
- 4568 événements de base
- Une EPS nécessite une base de données.



ARE système normal d'alimentation en eau des générateurs de vapeur
 ASG système auxiliaire d'alimentation en eau des générateurs de vapeur
 OP action de l'opérateur
 RIS système d'injection de sécurité
 VDP soupapes du circuit primaire

Outils de traitement actuels des EPS
 Risk-Spectrum (Europe), Cafta (US)

En cas de perte totale de l'alimentation en eau des générateurs de vapeurs il est possible d'éviter la fusion du cœur en ouvrant volontairement les soupapes du circuit primaire et en injectant de l'eau dans le circuit par le système d'injection de sécurité.



Exemple 1: le Wash 1400 (1975)

- La plupart des méthodes de sûreté de fonctionnement nécessitent de **l'expertise** pour les mettre en œuvre. C'est le cas notamment des arbres de défaillances et d'évènements utilisés dans les EPS.
- De nombreuses données sont nécessaires:
 - évènements initiateurs,
 - défaillances critiques,
 - données de fiabilité humaine
 - profil de fonctionnement.
- 200 experts (IEEE) ont été mobilisés pour constituer la base de données du Wash 1400 **par expertise**, le retour d'expérience américain étant insuffisant, au moment de l'étude.



Exemple 1: en France, apport de l'expertise pour le recueil EIReDA (1999)

- Sélection des matériels importants pour la sûreté par des experts (concepteurs, constructeurs, exploitants, analystes de sûreté, R&D)
- Regroupement des matériels sélectionnés dans des familles
- Pour les matériels à zéro défaillance après plusieurs années d'exploitation , demande aux experts d'un intervalle min – max.



Eireda 2000

File Mode Edit View Switch Mode Help

C:\PROGRAM FILES\EIREDA2 Failure Type EPS

Mechanical Electrical

Component Pump Feedwater Main Pump 900.

Function Main Feedwater Pump ANG 001 002 PO APP 001 002 003 004 PO CP1,CP2

		Failure Rate lambda/h[E-6]		Probability of Failure on Demand Gamma/d[E-3]		Repair Time	Sample		
		Lambda/h	Lambda min	Gamma/d	Gamma min	T : h	Plant year	Eq/Plant	Eqpts Year
Prior	Critical	6.3	4.68	0.26	0.15	33			387
78/87		EF	Lambda max	EF	Gamma max	M/h			
			8.19		0.38	98			
Likelihood		Nb Failure	Cumulative Time (h)	Nb Failure	Nb Demands	Mtr : h			
88/98		9	3,30E+06	2	1,77E+04	35			514
Posterior Probability Interval						Man * h	Unavailability (MWh)		
		4.96		0.21		109			
		90 %		90 %					
		3.8	6.27	0.13	0.31				
Post Pdf Parameters	Gamma	43.2	8639171	Beta	14.9	68694			
Failure Mode	Mode	External leak (7 déf. (50%))		Mode	Loss of lubrication (4 déf. (28.5%))				
Other Sources EG&G	Critical	0.5	10						

Records Reference Date 08-26-2000

Comments
EPS Prior:reference data from all feedwater system pumps (CEX_APP,VTN,ACO)

For Help, press F1

Num Maj DEFIL

Démarrer Gestionnaire d... Inbox - Dossier... Microsoft Pow... Eireda 2000 15:34

Page of the EIREDA'2000 handbook.

Data concerning the main feedwater pumps (PWR 900MW)

Bayesian updating of reliability data : the a priori corresponds to critical related to safety failures on the period 78/87 (the a priori distribution of PSA data) ; the likelihood corresponds to observed failures on the period 88/98 ; the a posteriori distribution (loi gamma, loi beta) of reliability performance is given, with the mean and the 90% confidence interval; a comparison is done with another reliability handbook when possible (here the EG&G handbook) ; EF is the error factor.



Exemple 2: les systèmes-experts

(années 80)

Le système expert rassemble des connaissances issues de l'expertise ou du retour d'expérience et les utilisent de façon analogue à celle d'un médecin ou d'un dépanneur. **Il reproduit le raisonnement d'un expert.**

A partir d'une base de connaissances (règles issues de l'expertise avec des « si », « et/ou », « alors ») et d'une base de faits (qui sont les symptômes observés), un **moteur d'inférence** gère les règles de connaissances suivant des méta-règles (priorités,...) pour proposer une action corrective ou préventive.

Si cette action s'avère positive, elle peut devenir une nouvelle connaissance de la base de connaissances.

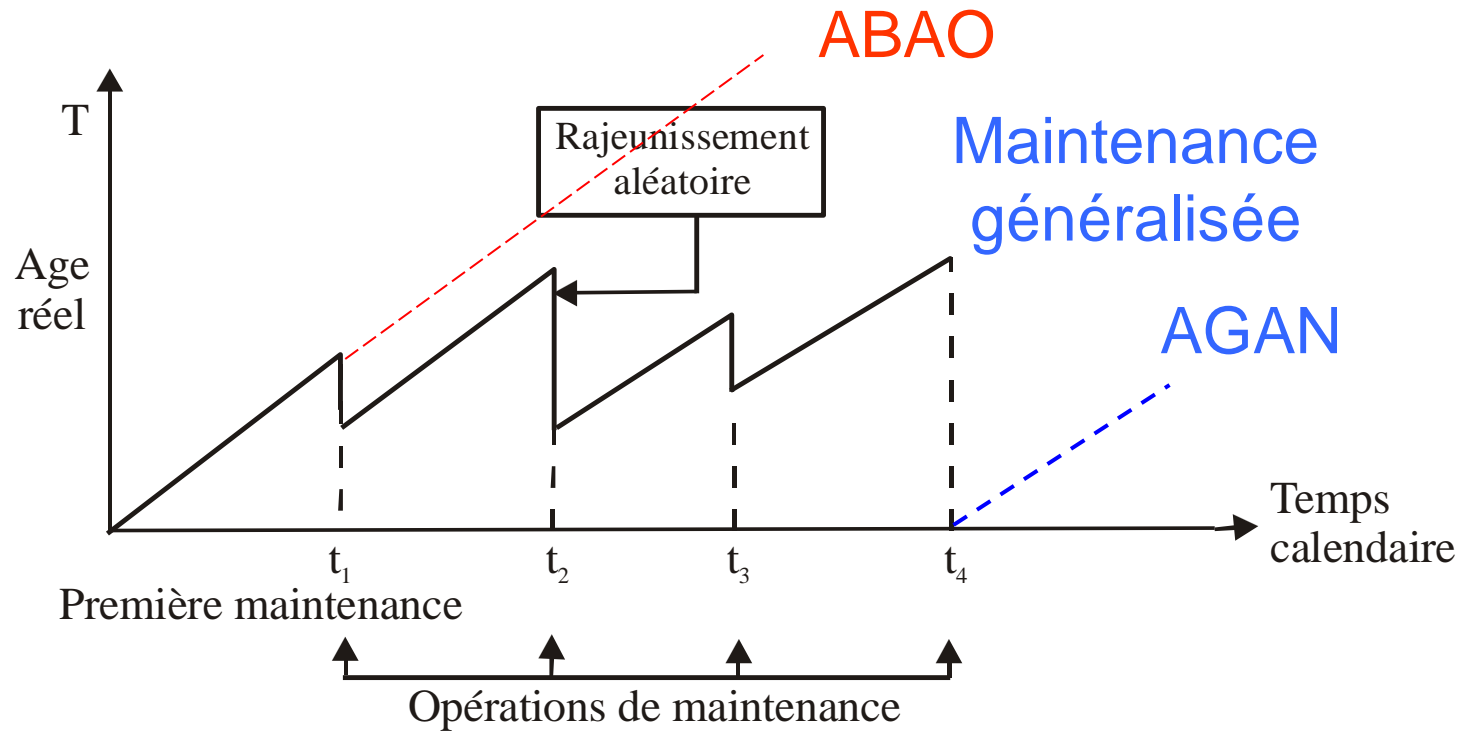
Exemple de règle: *si $\Delta\Theta$ forte vrai (observation, fait) et si $\Delta\Theta$ forte $\rightarrow \sigma$ élevée (règle) alors σ élevée vrai (conclusion, action)*

Difficultés: 1 modéliser le comportement et le raisonnement de l'expert;
2 acquérir les connaissances pratiques de l'expert;
3 lorsque plus de 100 règles, peu performant



Exemple 3: maintenance de composants réparables, efficacité de la maintenance

(Clarotti et al, 1994)



La principale difficulté est d'estimer le rajeunissement apporté par la maintenance

Effet des actions de maintenance sur le vieillissement des matériels réparables



Exemple 3: l'évaluation du vieillissement des matériels

Les matériels non réparables → le retour d'expérience ne concerne que les premières défaillances → nécessite le suivi d'un **nombre important de matériels**

La loi de **Weibull** est la plus utilisée pour un **seul mode défaillance**

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \Rightarrow F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Les matériels réparables: il faut prendre en compte **l'impact de la maintenance** et la possibilité de plusieurs modes de défaillance:

La **loi puissance**, la loi **log-linéaire** ou la loi de **Weibull conditionnelle** sont de bons candidats:

$$\lambda(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} e^{\gamma N(t)}$$

→ loi à **3 paramètres** dont γ (ou ρ) les facteurs de réduction d'intensité (d'âge) dans les modèles **ARI (ARA)**, représentent l'efficacité de la maintenance:

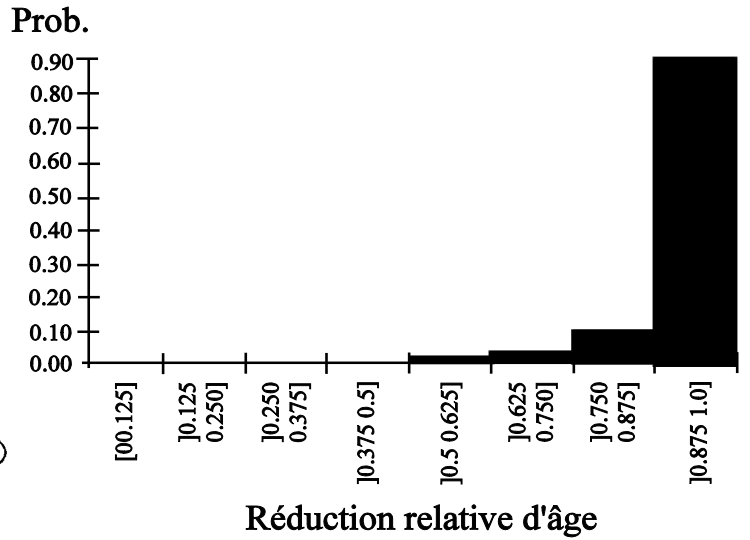
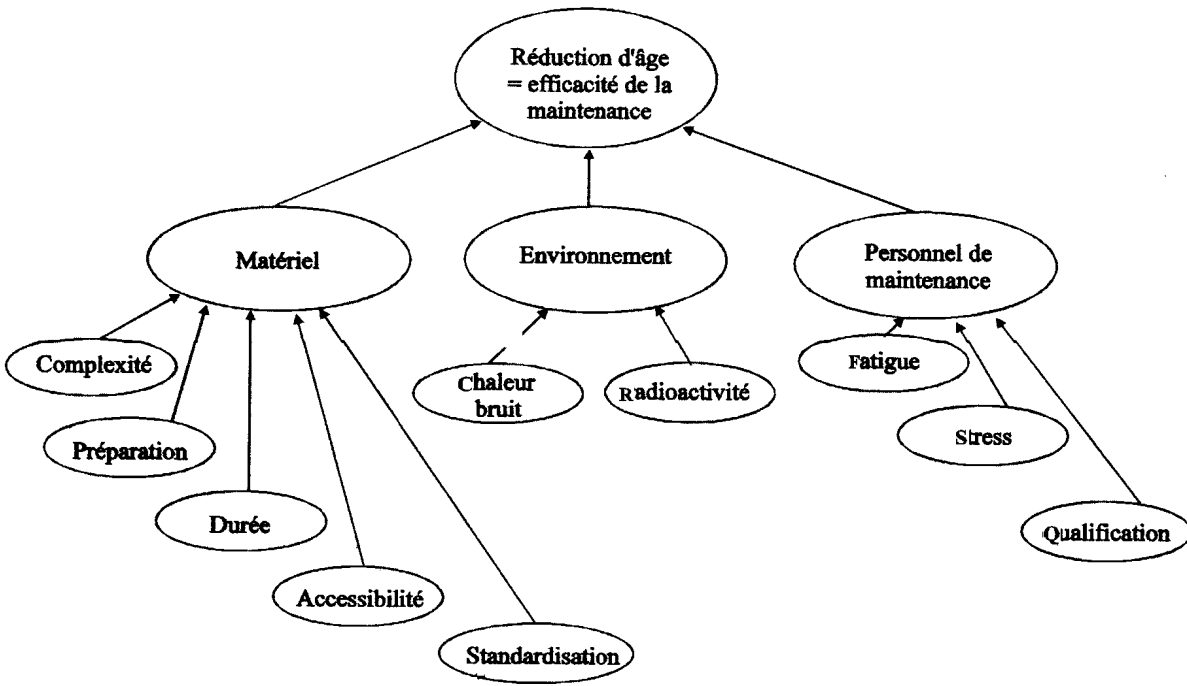
- $\gamma = 0$, ABAO, maintenance minimale (rétablissement de la fonction)
- γ grand, (en pratique $|\gamma| > 3$) AGAN, maintenance parfaite
- $0 < \gamma < -3$, maintenance imparfaite (efficace)
- $N(t)$: nombre espéré de défaillances de 0 à t



Exemple 3: maintenance de composants réparables (suite)

Diagramme d'influence

- Application à un **robinet pneumatique**.
- La fonction d'efficacité est modélisée par un **diagramme d'influence**.



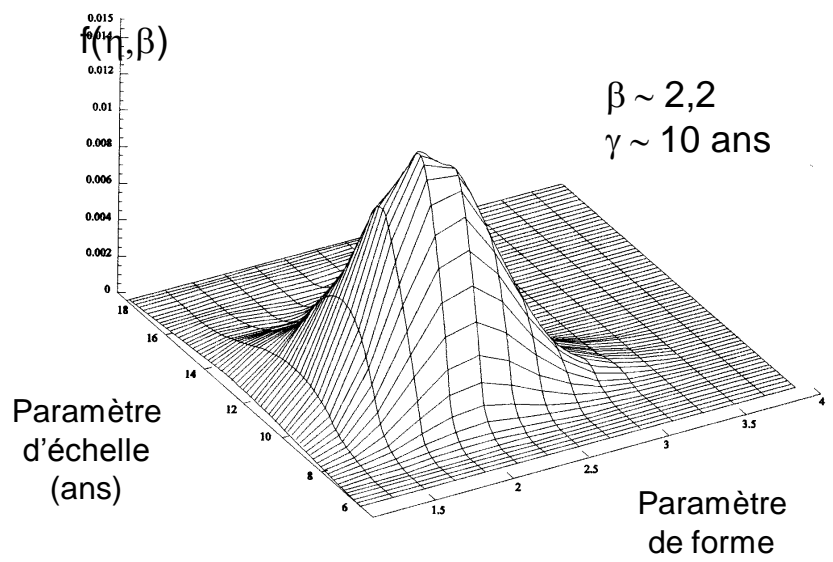
Remplacement des internes

Diagramme d'influence sur la fonction efficacité de la maintenance (exemple des internes de robinet, construit avec l'aide d'un expert maintenance (Delbos, 1992)).



Exemple 3: maintenance de composants réparables (suite)

Effacité sur la fonction de réglage du débit du robinet
20% : Rodage des internes
50% : Reprise d'usinage
80% : Remplacement des internes



Densité de probabilité jointe des paramètres de la loi de vieillissement intrinsèque de l'ensemble siège-obturateur d'un robinet réglant (loi de Weibull)

- Périodicité optimale de maintenance préventive égale à 5 ans pour un risque de défaillance de 0,2.



Interrogation directe sur l'efficacité de maintenance

Les experts connaissent le programme de base de la maintenance préventive du robinet.

Exemple: remplacement préventif des internes tous les x ans, x est un estimateur de la durée de vie des internes, incluant une certaine marge.

En cas de remplacement des internes on demande à 2 groupes d'experts : concepteurs (optimistes) et exploitants (pessimistes) si le robinet peut fonctionner x ans sans défaillance. Généralement ils répondent **non** car l'environnement des internes a vieilli. Ils estiment alors un temps de durée de vie y relativement au temps x ; l'efficacité est y/x .

REXPert V6.0 : Failure Repair Time

Repair Time / Maintenance Efficiency

Law: Normal Log Normal

Input Mode: Manual Input File

Browse: D:\Rexpert_anglais_V62\DATA\Failure_Time\robinet maintenance efficacité.xls

PRIOR

Obs.	Time
1	75
2	80
3	85
4	90
5	95
6	
7	
8	

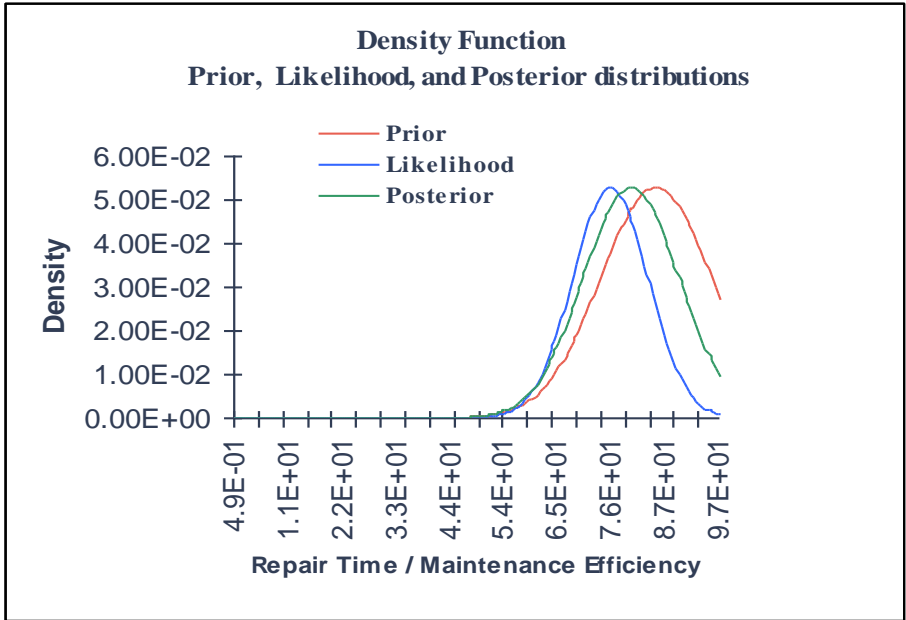
Input Data

Obs.	Time
1	75
2	75
3	80
4	85
5	75
6	70
7	
8	

Expertises

SIADCOM reXpert

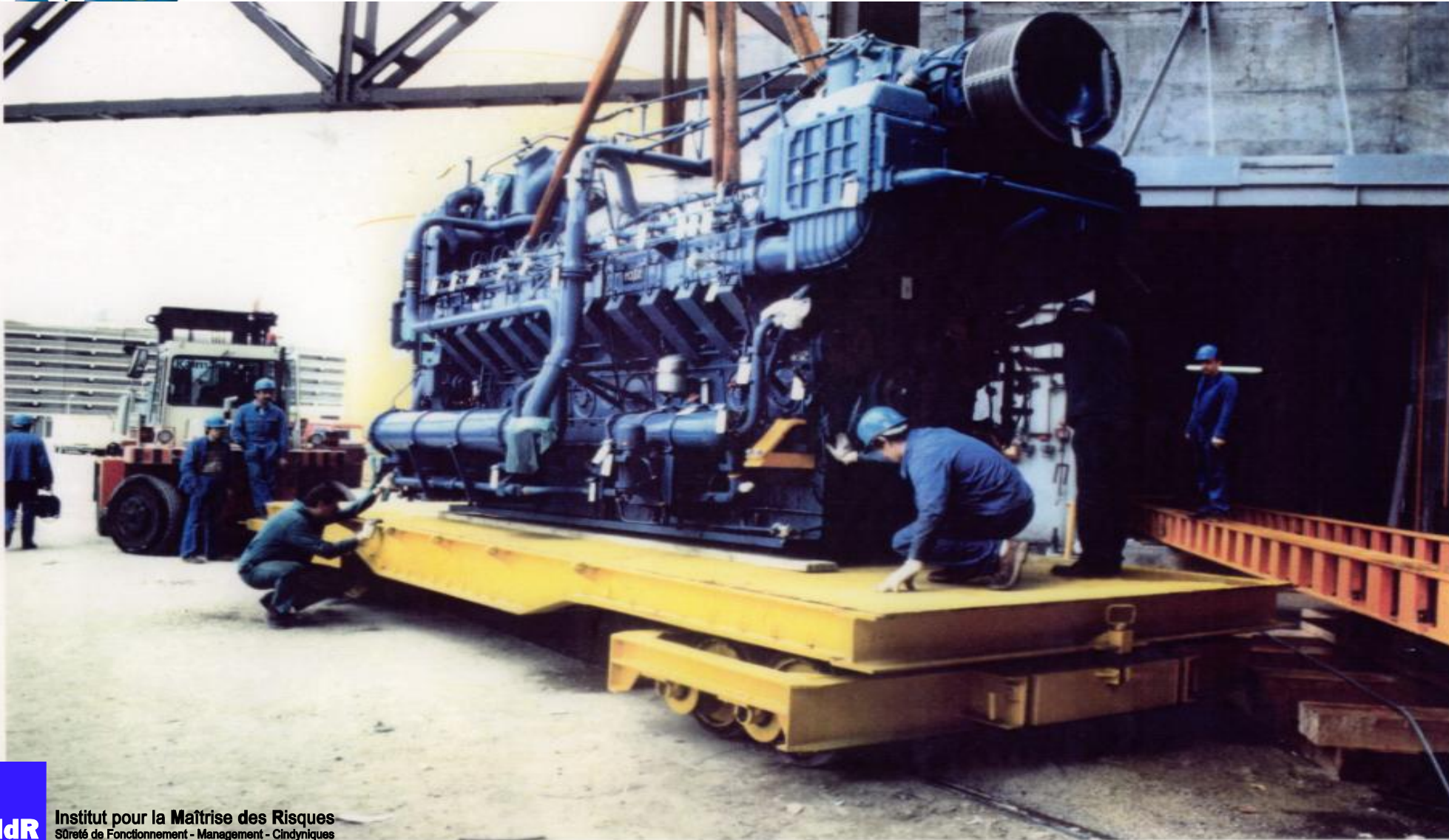
±





Exemple 4: optimisation de la maintenance d'un diesel

(Procaccia, 1994, 2011).





Optimisation de la maintenance d'un diesel

- Dans une centrale nucléaire, deux *diesels* assurent une **redondance de secours 100%** par unité en cas de **perte des sources électriques principales**.
- Ils sont utilisés pour alimenter les systèmes de sauvegarde, en cas de perte du réseau principal 400 kV, du réseau de secours 250 kV, et en cas de déclenchement de la tranche (échec de l'îlotage).
- Une **maintenance conditionnelle** du bloc moteur (par endoscopie) est effectuée **annuellement** et un **remplacement préventif systématique** des **20 chemises** des cylindres du bloc moteur est réalisé tous les **5 ans**.

1 - Quel est le risque de défaillance d'un groupe électrogène si des chemises sont dégradées?

2 - Quelle est la périodicité optimale de maintenance préventive?



Les problèmes à résoudre

1. Au cours d'un **contrôle endoscopique annuel**, on constate **un cylindre dégradé**. Doit-on le remplacer préventivement?

---> *Optimisation de la maintenance conditionnelle*

2. Quelle est la **meilleure périodicité** de remplacement des cylindres?

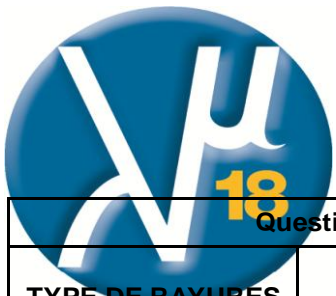
---> *Optimisation de la maintenance préventive systématique*



Optimisation de la maintenance des chemises d'un diesel

- **Analyse du retour d'expérience :** } Retour d'expérience = 372 groupes X ans
 - 5 défaillances,
 - 13 dégradations,
 - → loi de Weibull ($\beta = 1,42$; $\eta = 303$),
 - matériel de sauvegarde, disponible en attente, **mission de 72 à 200 h.**
- **Interrogation d'experts, afin de déterminer :**
 - la probabilité de défaillance à la sollicitation en état dégradé,
 - la probabilité de fonctionnement en état dégradé pendant une durée déterminée,
 - la probabilité d'une indisponibilité d'une durée supérieure à 72h.

→ Les experts distinguent 6 catégories de fissure



Optimisation de la maintenance des chemises d'un diesel: *élicitation de l'expertise*

Questionnaire		Réponses	
TYPE DE RAYURES	TEMPS DE FONCTIONNEMENT PROPOSES (heures)	NOMBRE DE OUI	NOMBRE DE NON
GRIFFURES	24	9	0
	48	9	0
	72	9	0
	200	9	0
RAYURES ETALEES COURTES	24	9	0
	48	9	0
	72	9	0
	200	5	4
RAYURES ETALEES LONGUES	24	8	1
	48	8	1
	72	8	1
	200	4	5
RAYURES PROFONDES COURTES	24	7	1
	48	7	1
	72	5	3
	200	4	4
RAYURES PROFONDES LONGUES	24	6	2
	48	6	2
	72	4	4
	200	2	6
RAYURES ENTRAINANT FUITE D'HUILE OU SURPRESSION CARTER	24	1	7
	48	1	7
	72	1	7
	200	0	8

Questionnaire et réponses obtenues au cours de l'expertise :

Question posée : **pour un type de dégradation, une chemise dégradée peut-elle fonctionner 24, 48, 72 ou 200 heures ?**

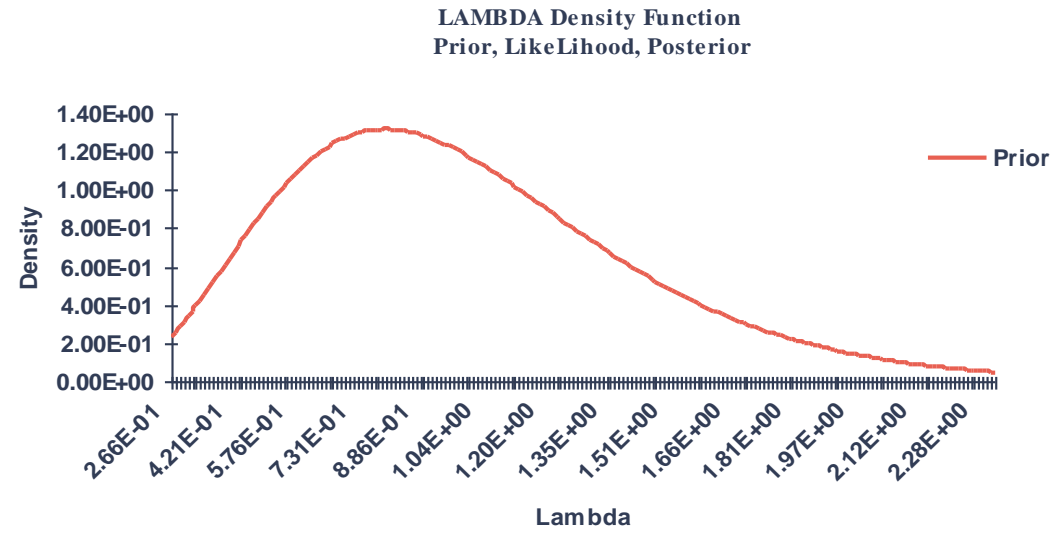
- **72 heures** correspondent au temps nécessaire pour installer le diesel d'ultime secours du site.
- **200 heures** est le temps pour lequel l'énergie résiduelle à évacuer devient très faible.

Remarque : un expert ne s'est pas prononcé pour les trois derniers cas.



Calcul
Rexpert

Modélisation de l'expertise a priori



Rexpert: ici nombre de succès, loi bêta a priori

Expertise
Oui / Non
8/9

Pondération
ou étalonnage
des experts

REXPRT V6.0 : Failure Rate computation (exponential-gamma data)

Input data

- Observation data: Number of failure (s) 8, Cumulate operating time 9, Confidence rate min 10%, Confidence rate max 90%.
- Gamma distribution: Confidence interval, Lambda min, Lambda max, Confidence interval, Gamma law parameters, Shape factor, Scale factor, Confidence interval.
- Non Informative Uniform Expertise: Confidence interval, Lambda min, Lambda max, confidence rate (%).
- Information Weighing: Reference, Fisher Information, Adequation, Quality, Free Weighing.

Prior Parameters frequential estimate

- Expectation: 8.89E-01, Standard deviation: 3.14E-01, Fisher Information: 1.01E+01, Weight Coefficient: 1.00E+00.
- Lambda min: 5.17E-01, Lambda Max: 1.31E+00, Shape Parameter a: 8.00E+00, Scale Parameter b: 9.00E+00.

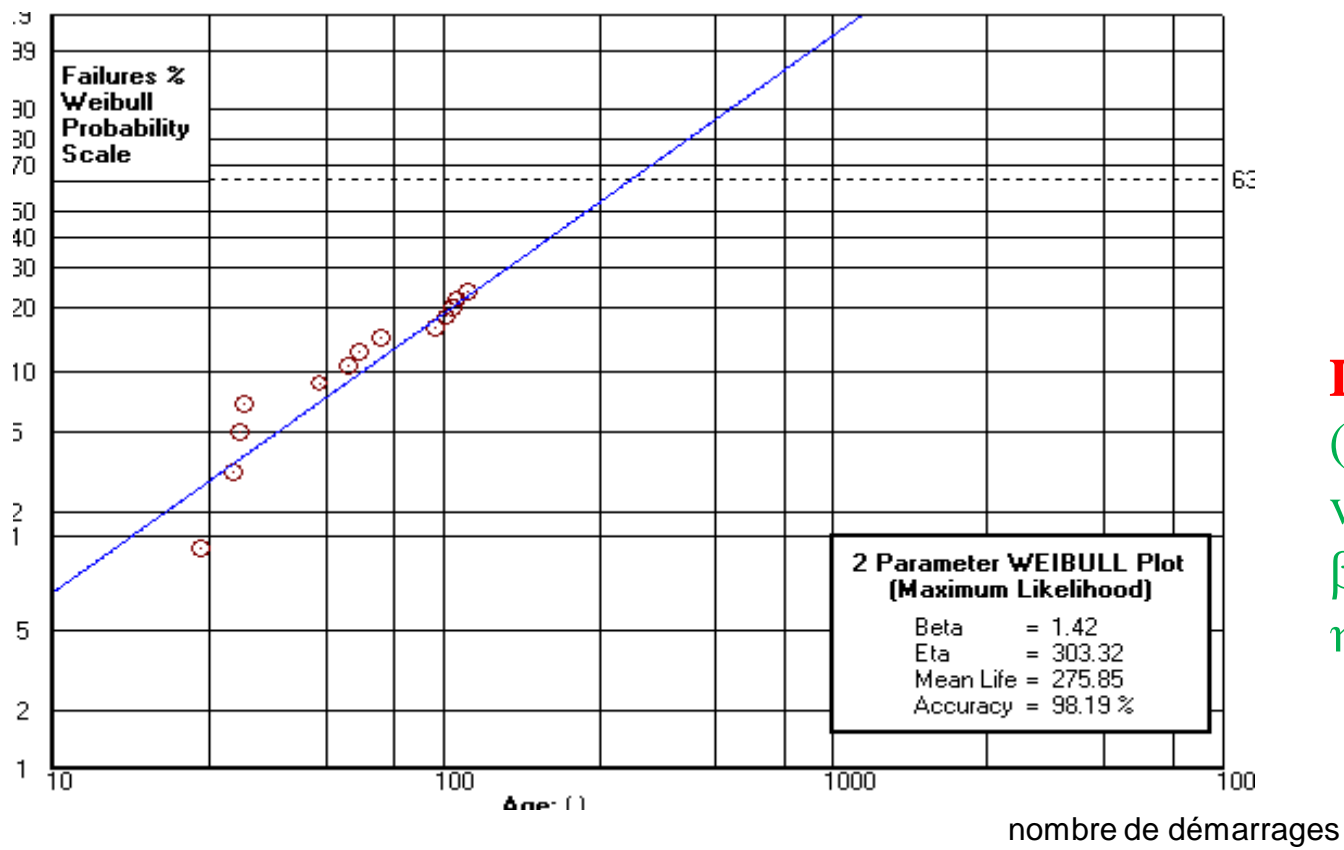
Autres modèles
d'expertise

Résultats
fréquentiels



Vieillessement des cylindres diesel

5 défaillances tardives en test,
13 dégradations sur les cylindres prises en compte dans l'analyse de Weibull



Weibull manuel
(méthode de régression)

$\beta = 1,69$
 $\eta = 250$

Logiciel Rexpert:

(Maximum de vraisemblance)

$\beta = 1,42 \pm 0,40$
 $\eta = 303 \pm 97$ (~ 12 ans)

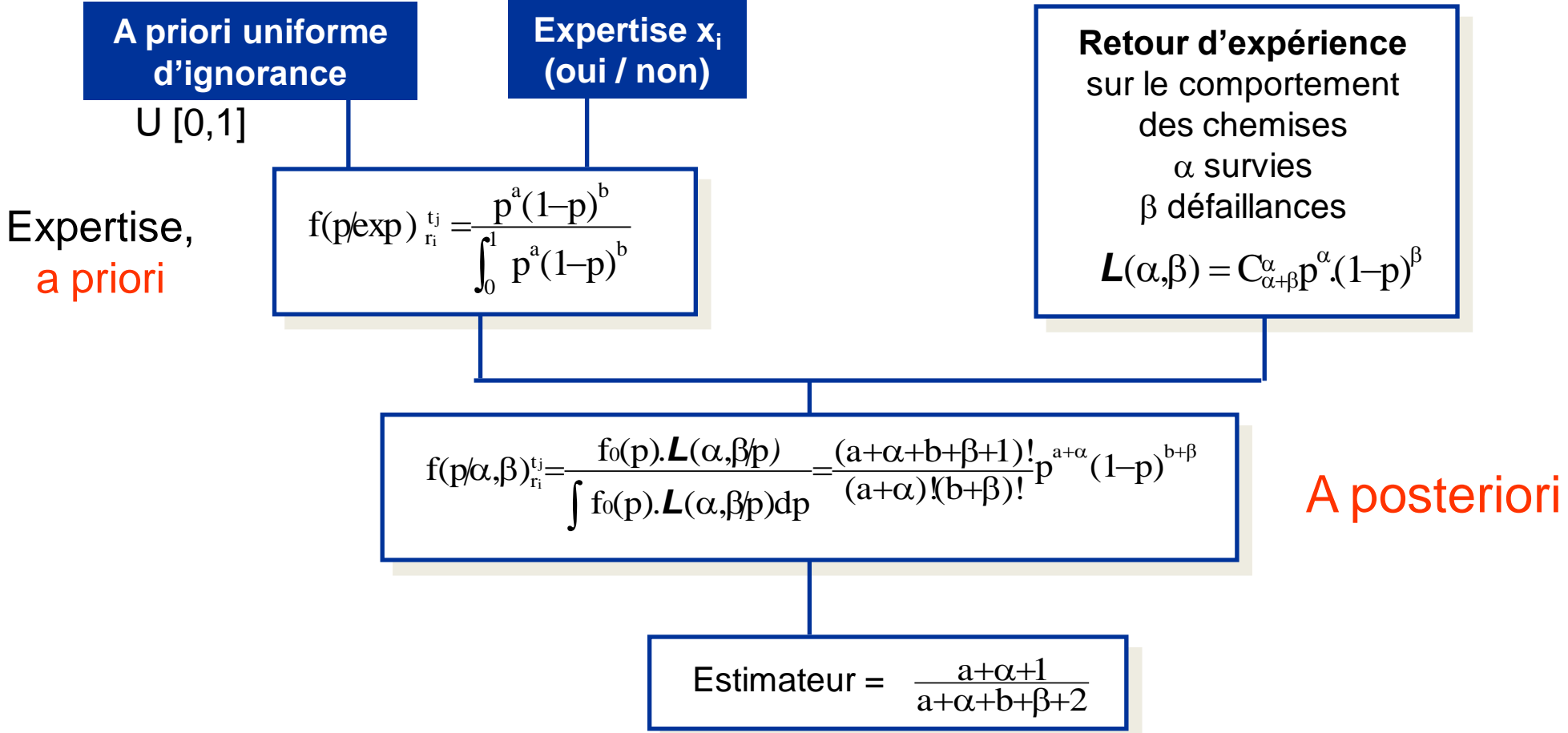
→ *Faible vieillissement au bout de 12 ans (25 démarrages /an)*



Optimisation de la maintenance des chemises d'un diesel

Modélisation de l'expertise

Modélisation de l'expertise, pour une rayure r_i à t_j .



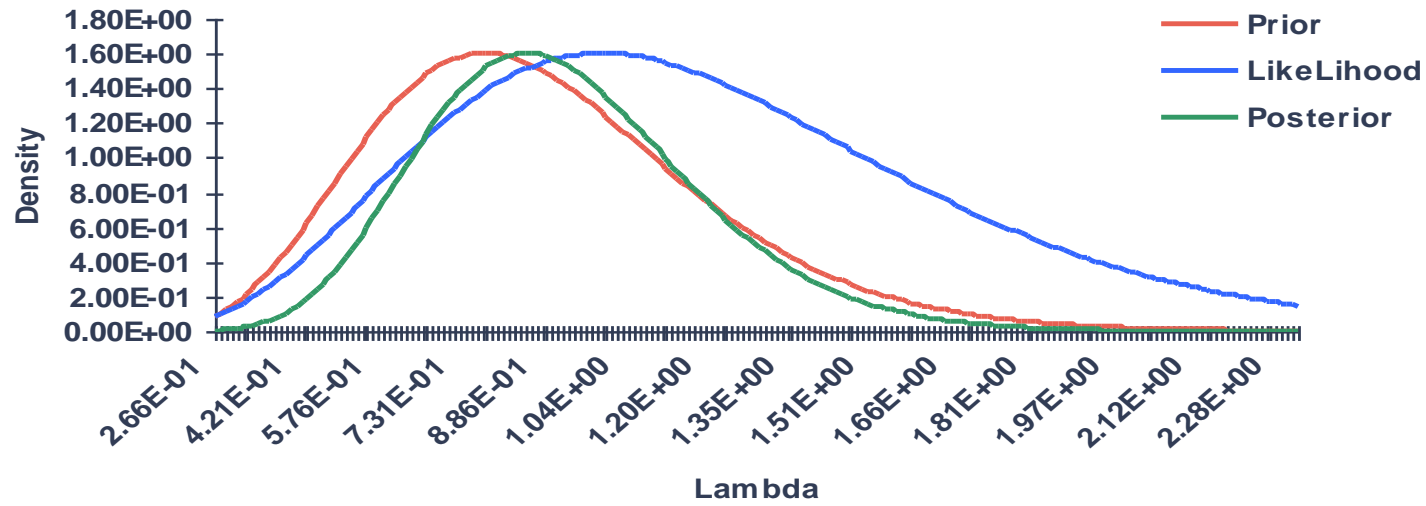


- **Exemple : constat d'une rayure profonde courte au cours d'un contrôle endoscopique. Probabilité de fonctionner 24h?**
 - Expertise : 8 experts / 9 estiment que le groupe peut fonctionner 24 heures.
 - Densité de l'expertise a priori:
$$f(E) = C_n^a p^a (1-p)^{(n-a)} = 9 \cdot p^8 \cdot (1-p)$$
 - **Retour d'expérience** = 5 survies dans 5 cas → **Vraisemblance**
$$f(x_i/E) = p^5$$
 - **A posteriori**: lois conjuguées:
$$f(E/x_i) = 210 \cdot p^{13} \cdot (1-p)^1$$
 - **Estimateur = 0,875 → 87,5 % de chance de fonctionner 24 heures**



Optimisation de la maintenance des chemises d'un groupe électrogène

LAMBDA Density Function
Prior, LikeLihood, Posterior



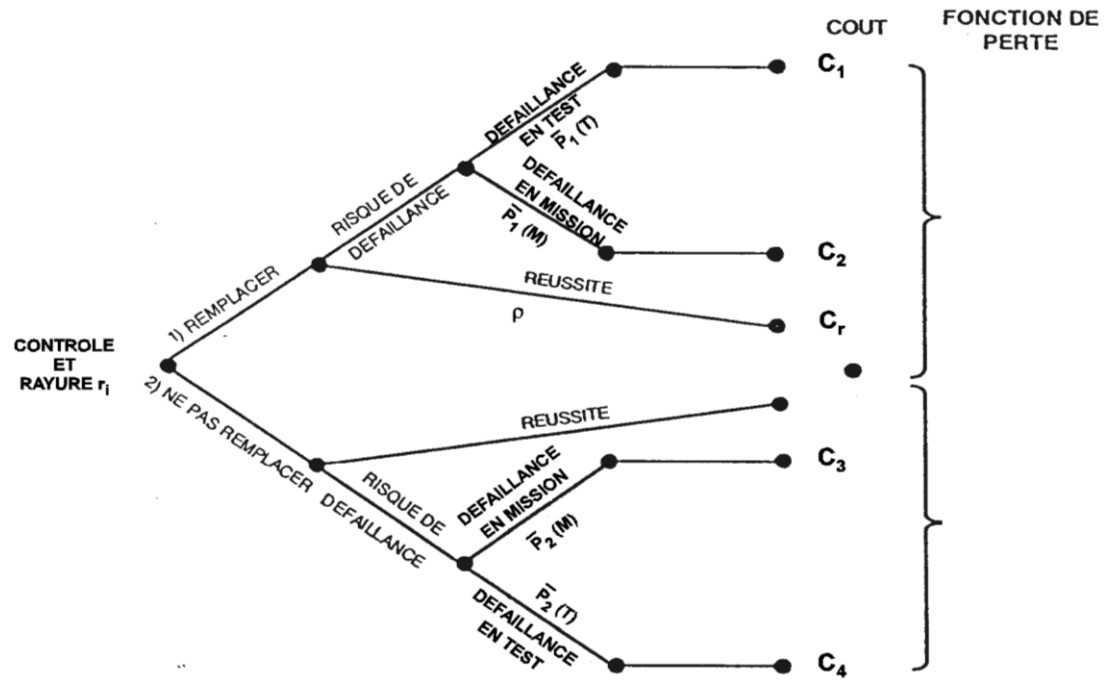
Distributions des densités de probabilité de la fonction de vraisemblance, de l'a priori et de l'a posteriori (calcul avec Rexpert).

Cohérence entre a priori et retour d'expérience

Les probabilités de dégradation en test et en mission sont déterminées à partir du retour d'expérience. Les probabilités de défaillance en test et en mission sont déterminées à partir de l'expertise sachant l'état de dégradation observé.



Arbre de décision lors d'un contrôle endoscopique

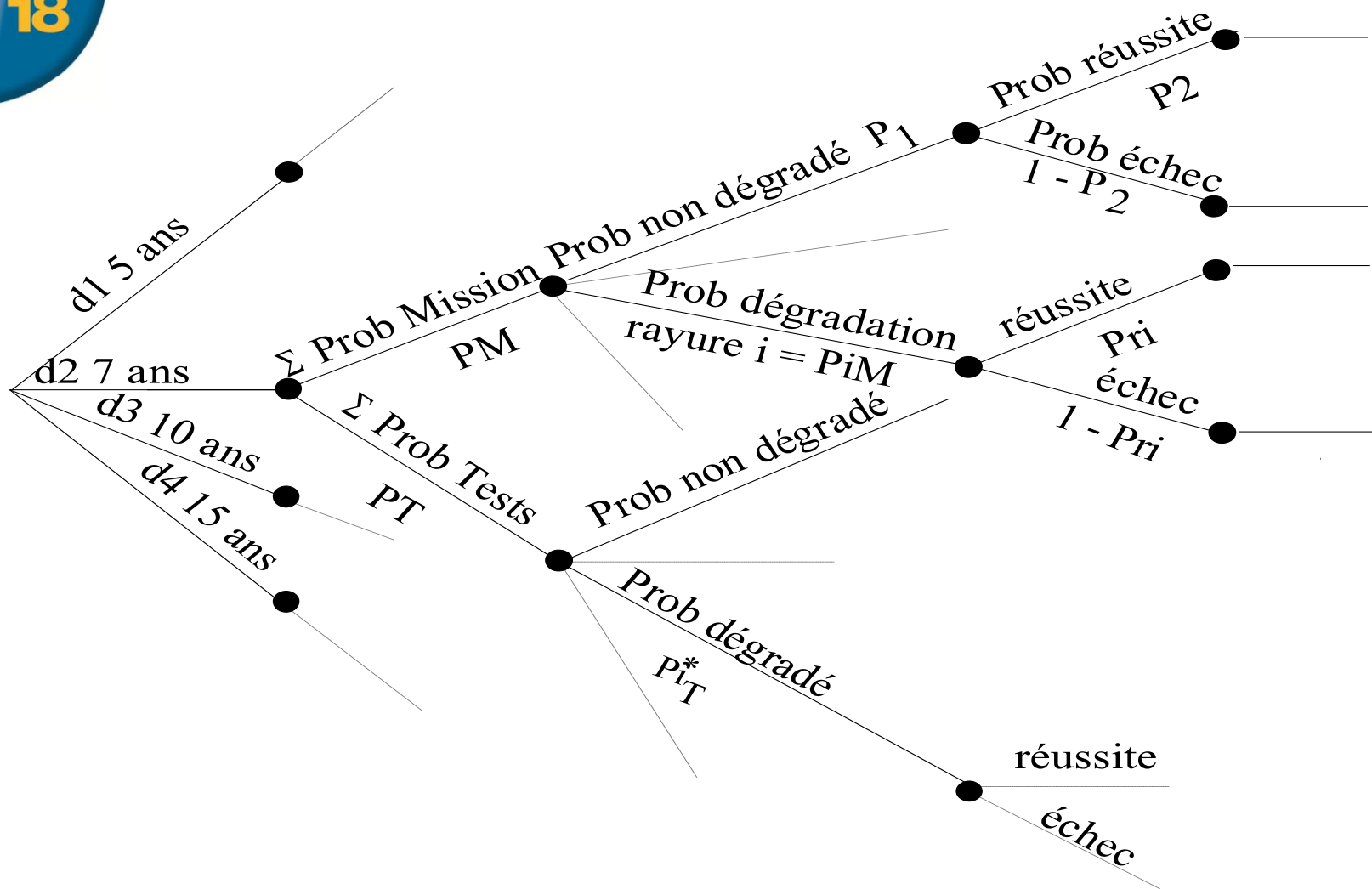


Fonction de perte : remplacement des cylindres = référence = 1.00
Fonction de perte : pas de remplacement = **0.28**

La fonction de perte correspond à la somme des coûts probabilisés de chaque option. Constructeur, ingénierie et exploitant ont été interviewés. Compte tenu de la redondance, l'option économique a été acceptée.



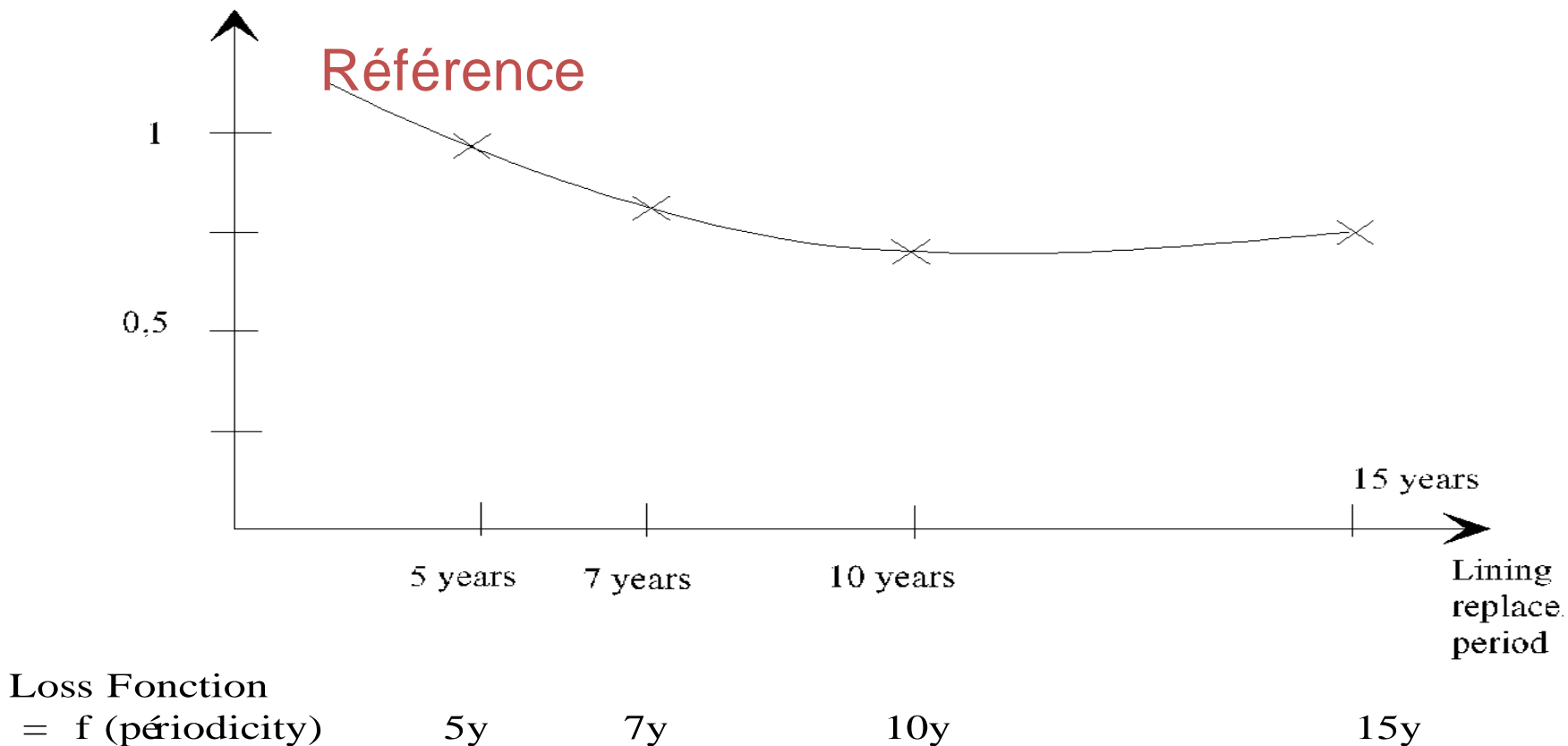
Optimisation de la périodicité de la maintenance périodique systématique





Périodicité optimale de maintenance préventive

Expectation
of relative
loss function



Sur ce critère, on peut passer de 5 ans à 15 ans.



Exemple 5 : analyse de Weibull en milieu très censuré (Bacha et al, 1998)

- Algorithme BRM (Bayesian Restoration Maximization); problème posé: construction d'une a priori pour β (loi gamma) et pour η (loi beta), paramètres de la loi de Weibull.
- 4 questions sont posées aux experts, l'information obtenue sert à estimer les paramètres des 2 lois.
- Q1 - *S'agit-il d'un matériel soumis à vieillissement?*
- Q2 – *L'augmentation de la fréquence des opérations de maintenance est-elle importante au cours de la durée de vie de ce matériel?*
- Q3 – *Les réponses fournies précédemment sont-elles basées principalement sur des faits réels (retour d'expérience, programmes de base de maintenance préventive, ...)*
- Q4 – *Compte tenu de la politique d'exploitation et de maintenance, la durée de vie du matériel, de sa mise en service à son déclassement, est comprise entre les temps T1 et T2. Donnez les valeurs de ces temps.*



Exemple 6: coûts de maintenance et durabilité (Chatelain, Lannoy, 2000)

Analyse des tendances des coûts de maintenance pour une installation vieillissante dans un cadre de prospective.

Utilisation de la méthode du réseau bayésien.

- structuration du réseau par expertise (18 variables, sous-réseau d'un réseau à ~200 variables)
- probabilités calculées sur la base de l'expertise ou du retour d'expérience

5 experts (de différentes compétences) ont participé pour définir la structure et préciser les valeurs de probabilités.

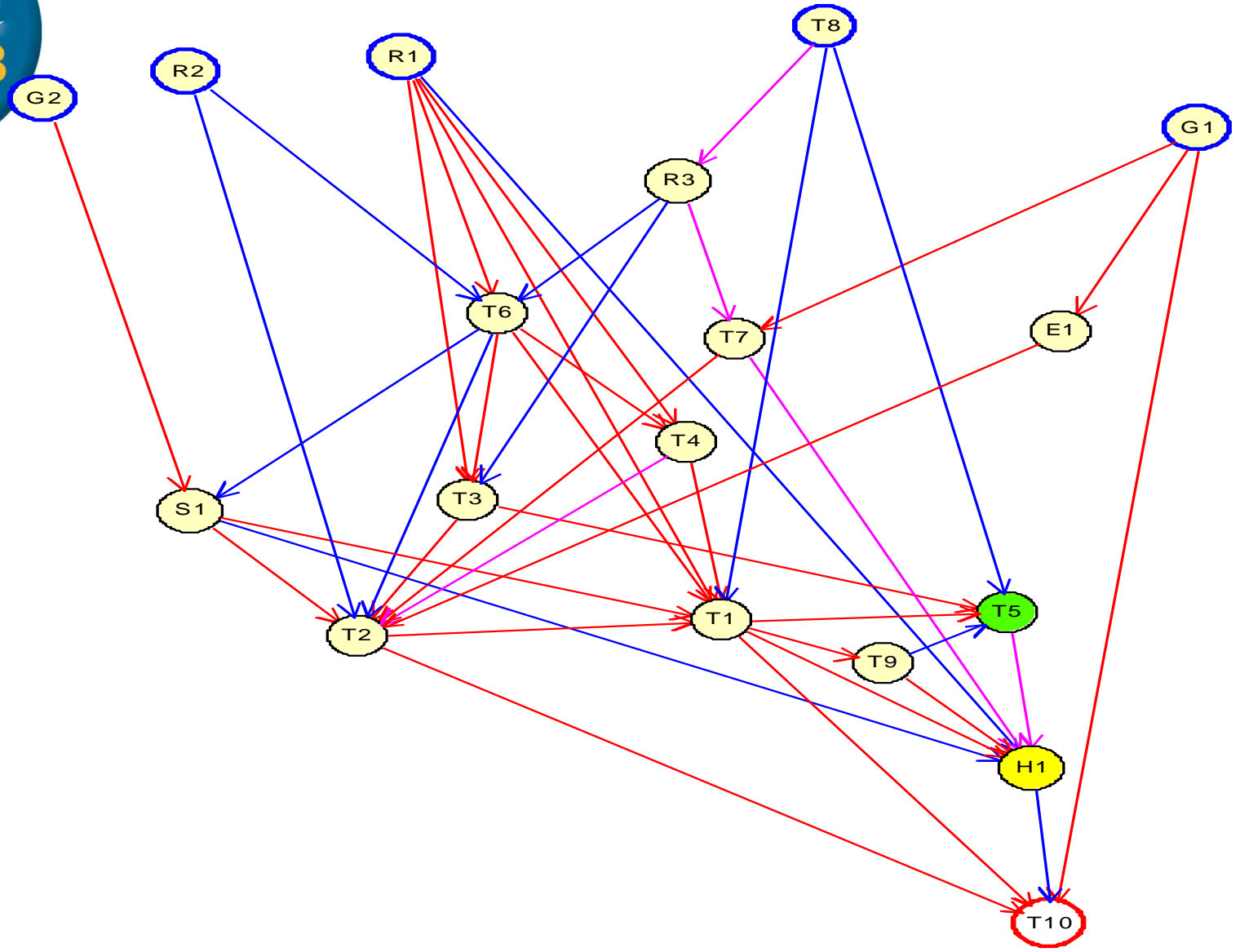
Résultat: les coûts de maintenance évoluent défavorablement
($0.56 \leq p \leq 0.80$)

si:

- 1 **absence de fournisseurs** pour les pièces détachées,
- 2 **durcissement** de la réglementation.



Abbreviation	Class of variables	Variable	Modality	Observations (deduced after building the model)
T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9 T10	Technical variables	Maintenance policy Replaceability of components Aging of components difficult to replace Aging of other components Overall condition of components Maintenance information system Existence of spare parts Appearance of new design faults Available technical margins Increase in maintenance costs	optimized/not optimized easy/difficult acceptable/problematic acceptable/problematic acceptable/problematic good/to be improved yes/no yes/no yes/no no increase/sharp increase	Input variable Output variable
R1 R2 R3	Regulatory variables	Safety rules Dosimetry regulations Standards	statu quo / more stringent statu quo / more stringent statu quo / more stringent	Input variable Input variable
E1 H1 G1 G2 S1	Miscellaneous variables	Control of the industrial context Production loss following an incident Presence of suppliers Staff motivation Continuity in skills	yes/no minor/great yes/no weak/strong well managed/poorly handled	Input variable Input variable





Exemple 7: diagnostic à partir du retour d'expérience et d'expertise –

rôle fonctionnel du joint 1

d'une pompe primaire 900 MW (Corset, 2003, 2006)

- Système mécanique d'une centrale nucléaire séparant le rotor d'une pompe primaire des composants statiques
- Fonction: 3 joints assurent l'étanchéité dynamique entre le fluide (contenu dans la pompe primaire) et l'extérieur
- Joint 1 est un joint d'étanchéité dynamique de type hydrostatique à fuite contrôlée
- Subit des pressions de l'ordre de 155 bars
- Pression en aval du joint 1 de 2 à 3 bars



Objectifs

Mieux comprendre le **processus de vieillissement**

- Modéliser sa durée de vie

- Modéliser l'interaction entre diverses variables

- Estimer la probabilité de dégradation ou de défaillance

- Détecter les **variables explicatives** les plus significatives

Mieux maîtriser les risques, et mieux maîtriser les coûts :

- Trouver des actions de maintenance appropriées

- Quantifier l'impact d'une action de maintenance**

- Différer ou éliminer le vieillissement

Aider à l'optimisation de maintenance :

- Analyse de sensibilité

- Analyse de données

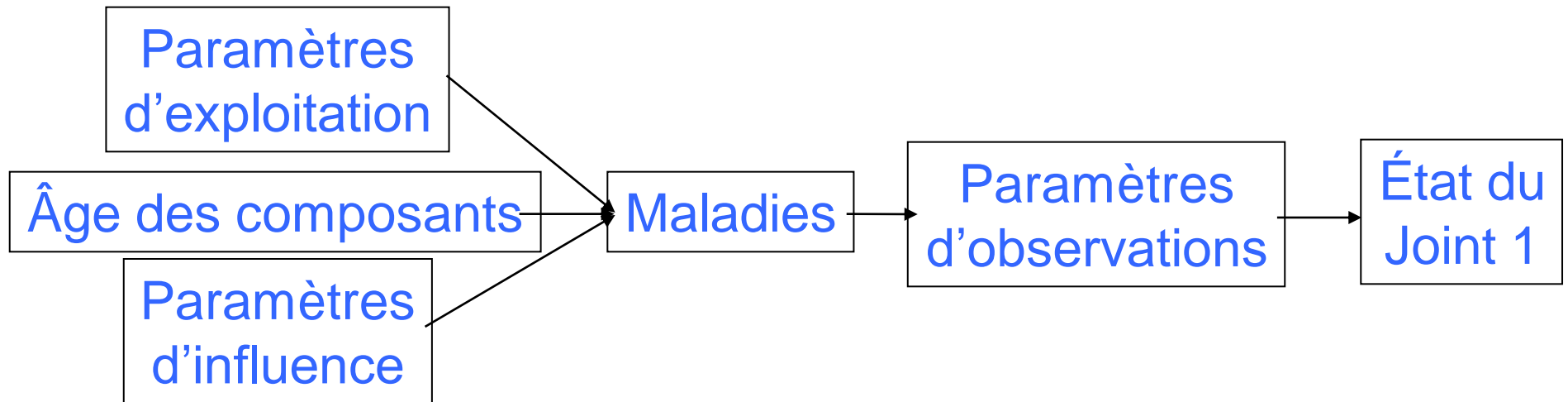
- Aide au diagnostic**

- Aide à la décision



Construction de la structure du réseau

Regroupement des variables de manière hiérarchique



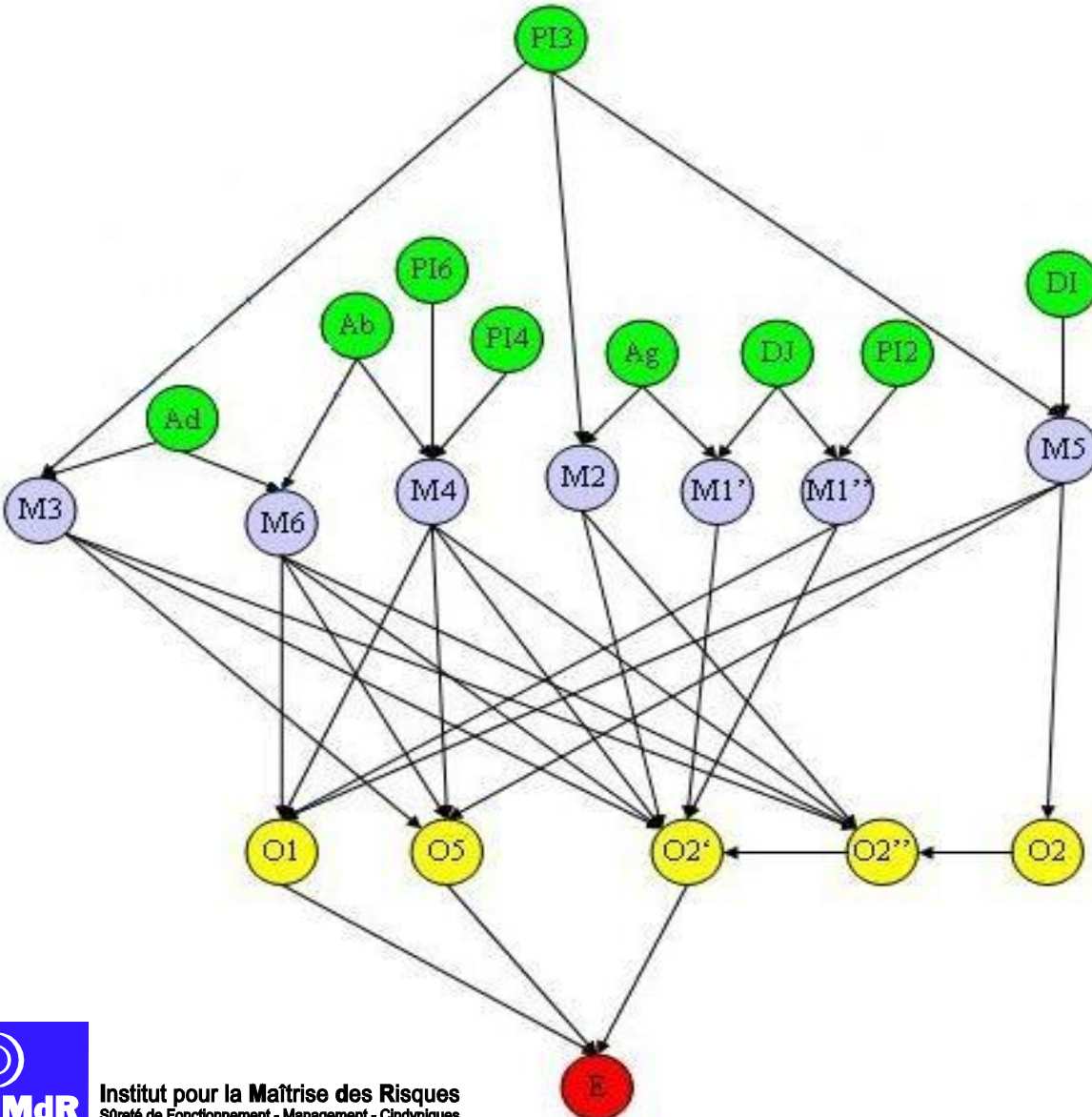
Ordre naturel = causalité

Trois types de variables :

d'entrée (indépendantes)

intermédiaires

expliquées (d'intérêt)



- Ad : âge de la douille
- Ab : âge de la bague
- Ag : âge de la glace
- PI2 : débit au démarrage à 25 bars
- PI3 : présence d'impuretés dans RCV
- PI4 : vibrations et déplacement d'arbre
- PI6 : températures du palier pompe
- DI : débit inverse
- DJ : démontage joint
- M1' : éclats, fissures des glaces
- M1'' : traces de frottement des glaces
- M2 : modification des profils glaces par usure
- M3 : dégradation douille logement par usure
- M4 : dégradation de l'étanchéité secondaire
- M5 : mauvais positionnement des glaces
- M6 : coulissement difficile de la bague
- O1 : niveau moyen du débit de fuite
- O5 : sensibilité anormale du joint
- O2' : plage de variation du débit de fuite
- O2'' : monotonie du débit de fuite
- O2 : stabilité du débit de fuite
- E : état du joint 1



Exemple 8 : croissance de fiabilité, conception

(Lannoy, Procaccia, 1998; Clarotti, Lannoy, 2004)

- Retour d'expérience de matériels identiques, sur 2068 heures d'observation :
 - **5 défaillances**
 - 9 suspensions
- Modification du matériel
- Retour d'expérience des matériels modifiés, sur 1183 heures :
 - 2 dégradations
 - 6 suspensions
- **Elicitation de deux groupes d'experts sur l'efficacité de la modification**

	Taux de détérioration avec l'âge	Durée de vie médiane du matériel modifié
Concepteurs	graduel, faible	5000 ± 1500
Exploitants	moyen	4000 ± 1500



Exemple 8: croissance de fiabilité

Méthode	β	(h)
Méthode de Johnson	1,3	1400
Méthode de Wayne-Nelson	1,2	1450
Maximum de vraisemblance	1,7	1450
SEM	1,8 (0,1)	1450 (50)
BRM - (1) 4000 - 6000 h (2) 1000 - 6000 h (3) 1000 - 4000 h	1,4 2,0 2,1	3850 2050 1800

Résultats obtenus à partir du retour d'expérience du **matériel ancien**.

Méthodes	β	η	Observation
Méthode de Johnson	1.4	1400	Pas d'amélioration
Méthode de Wayne-Nelson	1.0	1750	Amélioration
Maximum de vraisemblance	1.6	1700	Amélioration probable
SEM	2.4 (0.1)	1350 (150)	Pas d'amélioration
BRM (1) 4000-6000h (2) 1000-6000 (3) 1000-4000	1.6 2.0 2.2	4360 2360 1900	Amélioration très forte, on ne peut pas conclure
Méthode IBW (1)4000-5000h (2)4500-5000	1.1 1.3	2060 4700	Amélioration Amélioration forte

Comparaison des résultats obtenus avec le retour d'expérience du **matériel modifié**.

Un retour d'expérience complémentaire est nécessaire.

Exemple 9: analyse de risque

(Billy, Jaussaud, Lannoy, 2001)



- Objectif: mesure des **risques et aléas** relevant d'un choix managérial; variables structurantes, probabilité des différents scénarii, analyse de sensibilité
- **Méthodes des réseaux bayésiens**
- Expertise: 2 experts concepteurs, 2 experts exploitants, 2 experts R&D
- Le réseau a été construit par les experts.
- Les probabilités d'entrée et conditionnelles ont été obtenues prioritairement du retour d'expérience, sinon par expertise. Un questionnaire qualitatif d'une trentaine de questions a été établi. Il concernait la réglementation, les performances, le vieillissement et la durabilité, la durée de vie cible, l'opinion publique.



Exemple 9: analyse de risque

(Billy, Jaussaud, Lannoy, 2001)

Exemples de questions concernant les *performances*

Pensez-vous que les performances industrielles, à l'horizon 2015, vont rester stables, augmenter moyennement, augmenter fortement?

1 impossible, 2 possible, 3 probable, 4 très probable, 5 certain

(échelle de Likert)

Si le marché connaît une expansion en Europe, au même horizon, que pensez-vous de la probabilité que les performances des installations existantes soient augmentées?

1 très faible, 2 faible, 3 environ 1 chance /2, 4 forte, 5 très forte



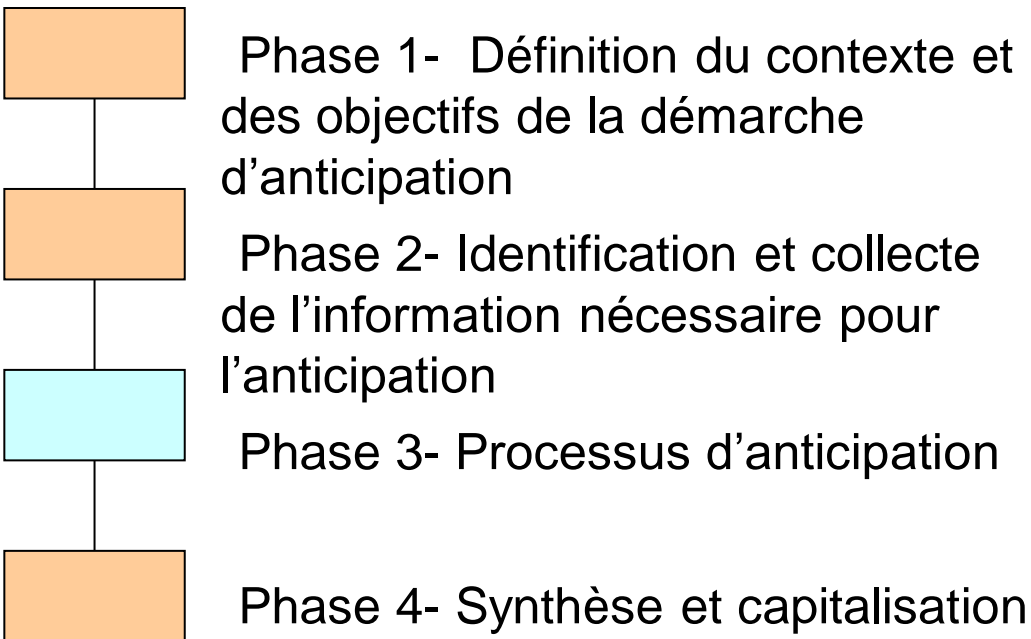
Exemple 10: anticipation (Marle, 2005)

- Application à un composant passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur (2005)
- Adaptation de la démarche à l'anticipation de défaillances pour un composant actif (2010)
- La démarche **AVISE** permet :
 - de juger l'état physique des composants.
 - d'identifier les problèmes potentiels que peut provoquer le vieillissement et d'adapter la maintenance nécessaire afin de le maîtriser.

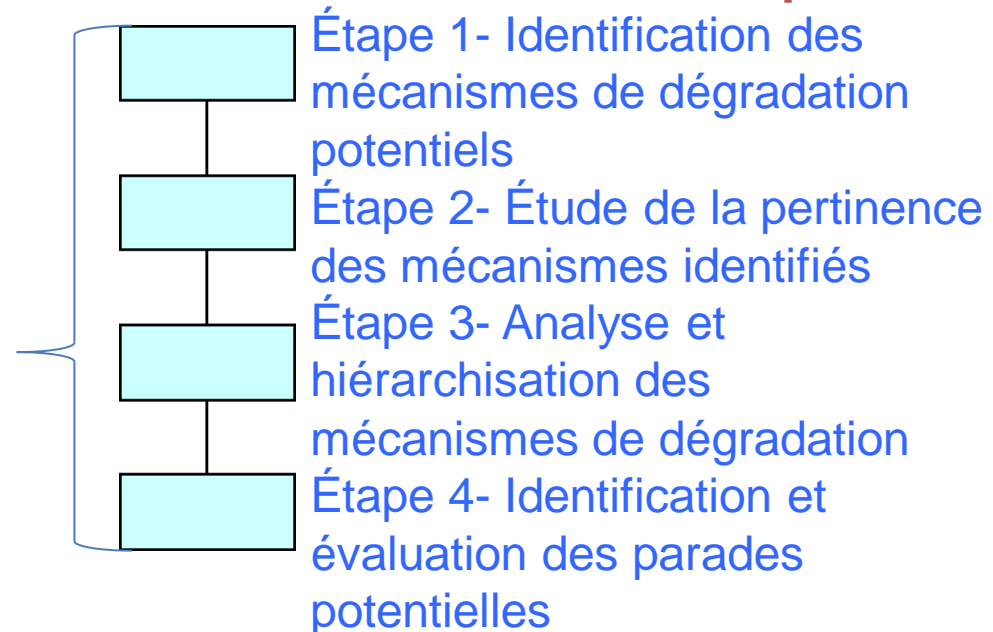


Anticipation: la démarche AVISE

Démarche globale d'anticipation : AVISE

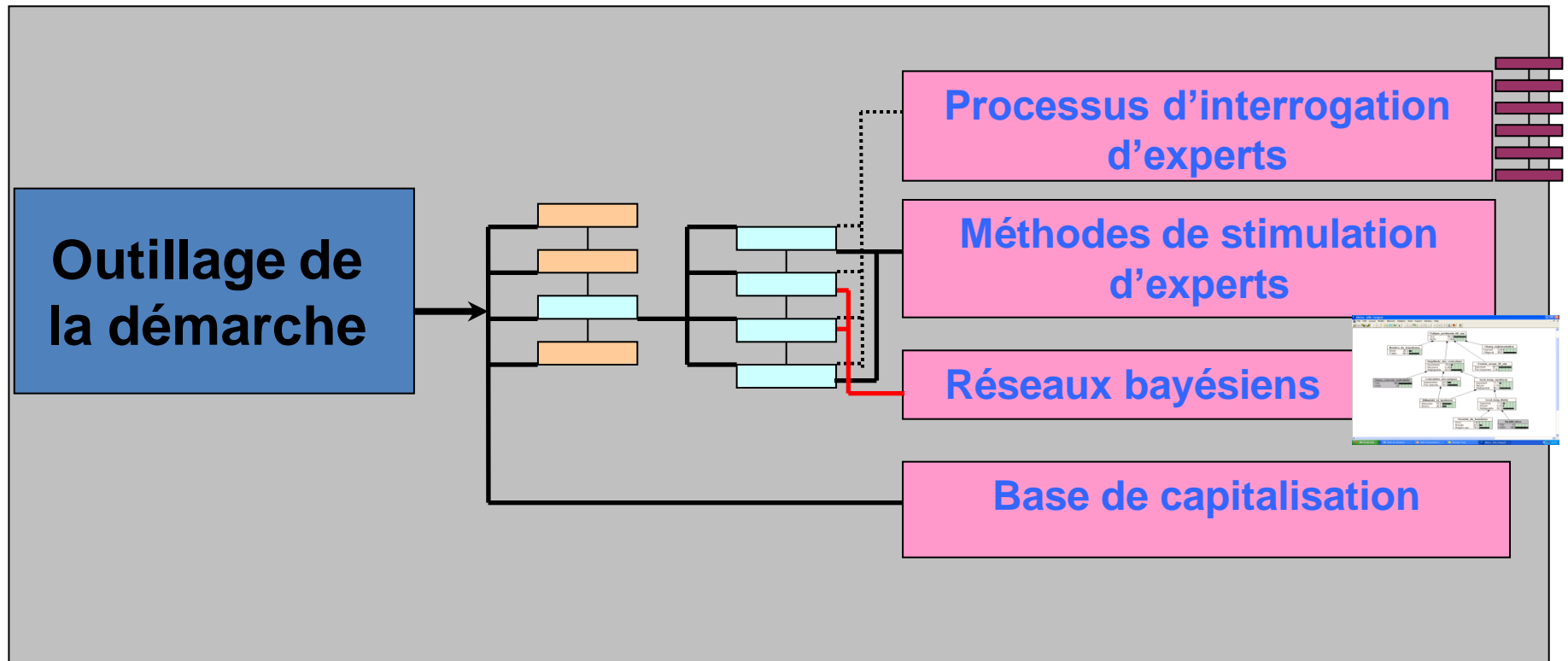


Processus d'anticipation





Les outils dans la démarche AVISE

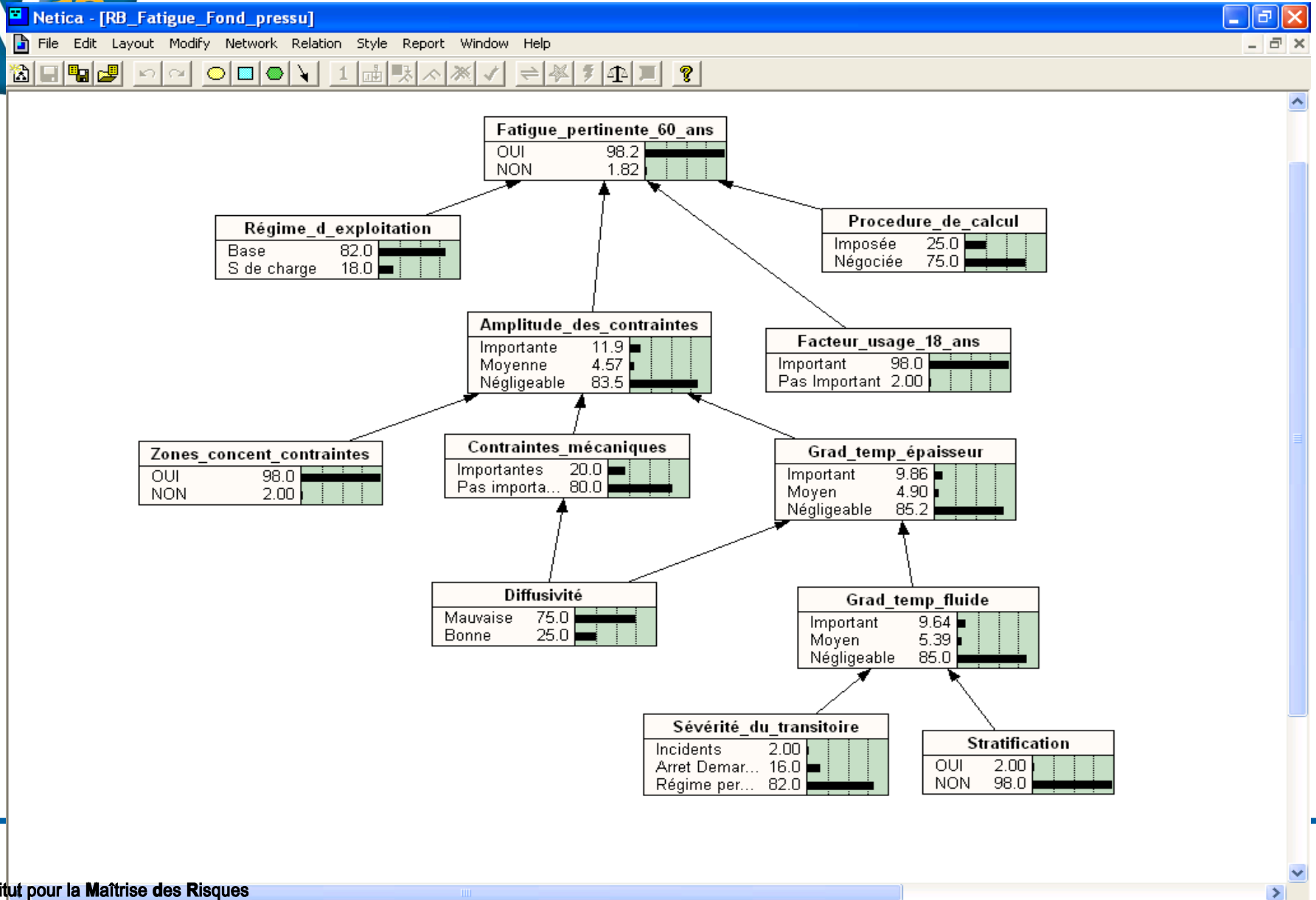




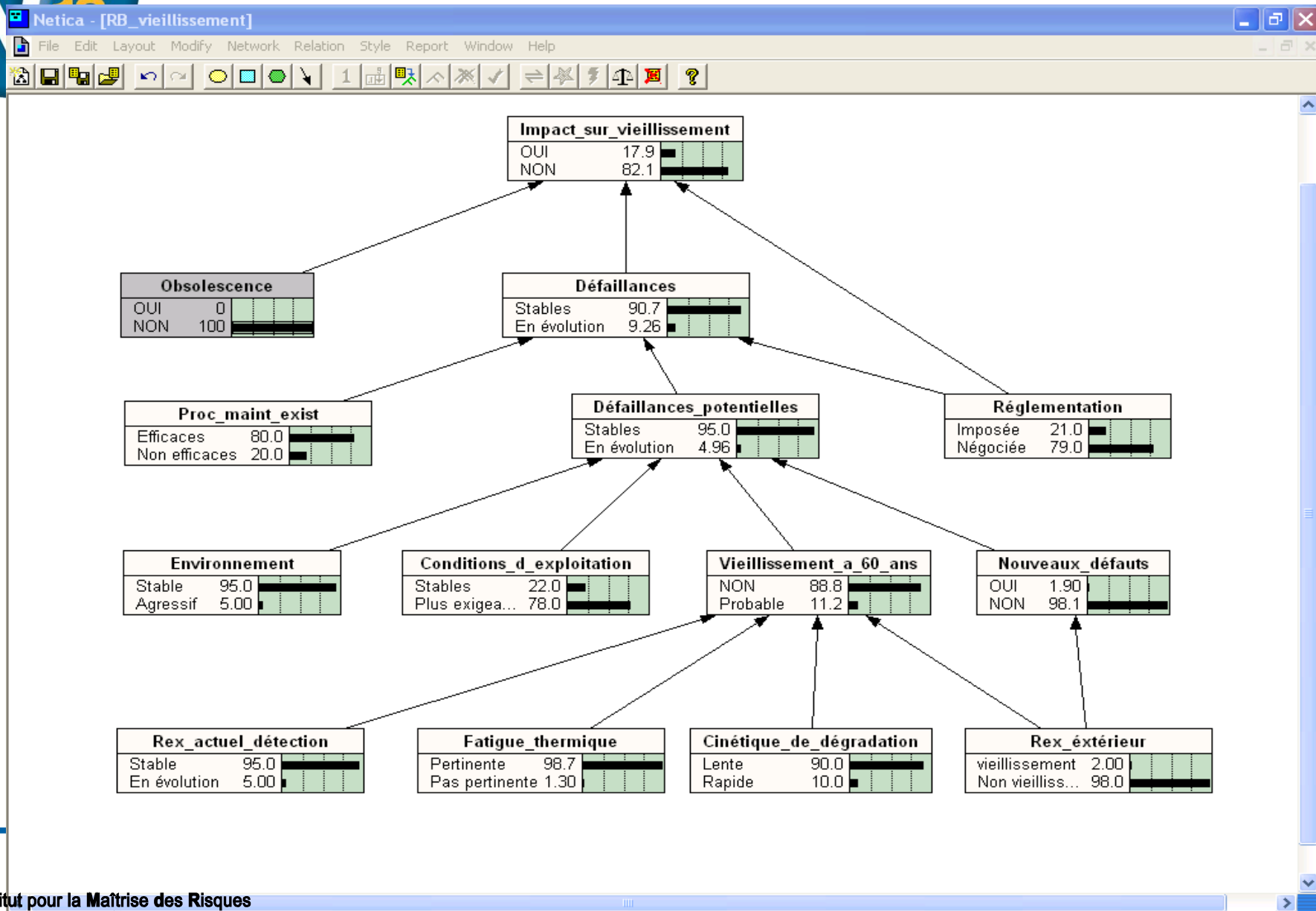
Le processus d'anticipation: application au pressuriseur

- Fonctions du pressuriseur:
 - Éviter la vaporisation dans le cœur du réacteur
 - Protéger le CP contre les surpressions.
 - Reprendre les variations de volume du fluide primaire.
- Réunion collective d'experts pour l'identification des mécanismes de dégradation potentiels (étape 1) : *42 triplets zone/mécanisme de dégradation/mode* ont été identifiés.
- Réunions individuelles et réunion collective d'experts pour l'étude de la pertinence et de la criticité des défaillances potentielles identifiées (étape 2) : réseaux bayésiens et hiérarchisation des triplets selon leur criticité (*14 triplets critiques* ont été identifiés) (étape 3).
- Réunion collective d'experts pour l'identification et l'évaluation de parades potentielles: pour *3 triplets critiques* (étape 4).

Réseau bayésien : pertinence de la fatigue thermique (réseau construit avec 2 thermomécaniciens)



Réseau bayésien : impact sur le vieillissement





Exemple 11: adaptation de la démarche AVISE aux matériels actifs

(Cagnac et al, 2010, pompe d'un circuit secondaire de centrale)

Ressources informationnelles

- Informations sur le matériel
- REX
- Revue systématique des composants et paramètres de fonctionnement
- REX analogue
- Documents ingénierie du matériel (Exploitation, conception, ...)

Etapes du processus d'anticipation

Etape 1 :
Recueil des connaissances actuelles des experts

Synthèse des défaillances actuelles

Menaces pour les années à venir

Etape 2 :
Identification de défaillances potentielles et des conditions propices

Point de vue Matériel

Point de vue Mode d'exploitation

Ressources méthodologiques

- Parage de l'historique
- Brainstorming
- Questionnaire
- Approche analogue
- Matrice de découverte
- Principes de la méthode de résolution des contradictions techniques de TRIZ



7 Conclusions et perspectives

ASK AN EXPERT





Conclusions

- L'expertise est un **outil d'aide à la décision**.
- Ne jamais se priver d'intégrer une connaissance d'expert, même si elle est vague (car elle permet l'expression du retour d'expérience).
- Le retour d'expérience est stratégique, l'expertise est complémentaire.
- La méthode de prise en compte de l'expertise doit rester simple, facile d'emploi, compréhensible.
- La sélection des experts est difficile, surtout pour les enjeux de sécurité - sûreté.
- Toute expertise doit être tracée (la capitalisation de l'expertise est essentielle). On doit pouvoir la retrouver et l'exploiter à nouveau.
- La démarche bayésienne est souvent utilisée lorsqu'il s'agit d'exploiter l'expertise à des fins quantitatives. Des analyses de sensibilité doivent toujours être réalisées.
- Les résultats obtenus doivent être discutés avec les différents acteurs.



Les perspectives

- Le développement du **retour d'expérience**: collecter des données pour réduire l'incertitude, enjeu opérationnel. Il n'y a jamais assez d'informations pour acquérir la certitude.
- Les démarches, méthodes, outils de **capitalisation de l'expertise** (par exemple, la base de données du logiciel Rexpert).
- La qualification des experts.
- Le développement **d'outils d'intégration de l'expertise et du retour d'expérience**.
- Des **guides pratiques d'utilisation** de l'expertise tout au long du cycle de vie.
- Le développement des **méthodes de diagnostic, anticipation, pronostic**.



8 Pour en savoir plus...

Arsenis S., Aufort P, Procaccia H., (1999), *EIReDA 98, European Industry Reliability Data Bank*, EDF/ CEE JRC Ispra. Editions Crete University Press, mary@physics.uoc.gr.

- **Bolado-Lavin R., Devictor N. (2005), CEA-JRC, Actes du workshop « *the use of expert judgement in decision making* », Aix-en-Provence, 21-23 juin 2005.**
- Bousquet N., *Analyse bayésienne du vieillissement de la durée de vie de composants industriels*, thèse de l'Université Paris-Sud, 19 décembre 2006.
- Bouzaïene-Marle Leïla, (2005), *AVISE, anticipation des défaillances potentielles dues au vieillissement par analyse du retour d'expérience*, thèse de l'Ecole Centrale Paris, 4 avril 2005.
- Clarotti C, Lannoy A, Procaccia H, Villain B. (1994). *ARCS : outil logiciel pour la quantification de l'effet de la maintenance sur la durée de vie*, Colloque $\lambda\mu$ 9, ESREL'94, La Baule.
- Clarotti Carlo (1998). *Fondements et applications des approches fréquentielle et bayésienne dans le domaine de la sûreté de fonctionnement*, ISdF, projet 8/96, juin 1998; *Applications à la maîtrise du risque industriel*, Henri Procaccia, Collection SRD sciences du risque et du danger, éditions Tec&Doc, Lavoisier, 2008.
- Cojazzi G., Guida G., Pinola L. (1998),, in A. Mosleh, R.A Bari (Eds), *Expert Judgement Methodology and its Application in the Prediction of the Results of a Fuel Coolant Interaction Experiment*, PSAM4, 13-18/09/1998, New-York City, Springer-Verlag, London.



8 Pour en savoir plus...

- Cooke R.MR (1991), *Experts in Uncertainty, Expert Opinion and Subjective Probability in Science*, Oxford University Press; New-York, 1991.
- Lannoy A., Procaccia H. (2001), *L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement*, Lavoisier, Editions Tec&Doc.
- Lindley D.V. (1988), *The use of Probabilistic Statements in Accelerated Life testing and Experts Opinions in Reliability*, School of Physics, Italian Physical Society, Course CH, North Holland.
- Meyer M., Booker J.M. (1993), *Expert Judgement: A Practical Guide*, Academic Press, London (note: version précédente; *Eliciting and Analysing Expert Judgement*, 1991).
- Procaccia Henri (2009), *Introduction à l'analyse probabiliste des risques*, Collection Sciences du risque et du danger, Editions Tec&Doc, Lavoisier.
- Procaccia Henri (2011), *La démarche décisionnelle bayésienne*, Formation EUROSAE (ENSTA).
- Procaccia Marc (2012), REXPERT V6.2, *User manual*.(siadcom1@gmail.com)
- Singpurwalla N. (2006), *Reliability and Risk – A Bayesian Perspective*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- US NRC, *Severe Accident Risks: An Assessment in Five US Nuclear Power Plants*, Vols 1, 2, 3, Washington DC, Report NUREG-1150, updated march 2011.



Quelques outils logiciels fiabilistes utilisant l'expertise

- **Le plus complet: Rexpert**, qui intègre de très nombreuses fonctionnalités, dont:
 - la modélisation de l'expertise en fiabilité, les calculs fréquentiels et bayésiens des paramètres de fiabilité,
 - le processus de vieillissement des matériels réparables et non réparables, l'analyse de Weibull, les processus de comptage, NHPP
 - l'optimisation de la maintenance et l'efficacité de la maintenance.
- **Durée de vie**: calcul de la fiabilité en milieu très censuré
- **IBM**: prise en compte de l'expertise dans la conception d'un nouveau produit
- **IBTV**: détection d'un vieillissement
- Pour mémoire, quelques outils fréquentiels en fiabilité (utilisant le retour d'expérience, sans prise en compte de l'expertise): **Mars, Minitab, Relcode, Weibull ++**